INVESTIGACION y CIENCIA

NOVIEMBRE 2002
5 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

EL TIEMPO

LA FLECHA DEL TIEMPO

MEDICION DEL TIEMPO

TIEMPO Y ETERNIDAD

EL TIEMPO MENTAL

UNA MAQUINA DEL TIEMPO

FILOSOFIA DEL TIEMPO

EL TIEMPO BIOLOGICO

Y MAS ...

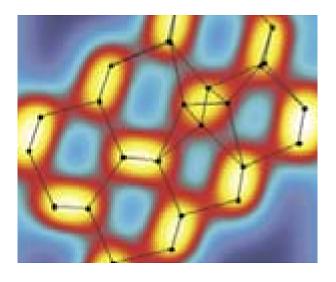




Noviembre de 2002 Número 314

SECCIONES



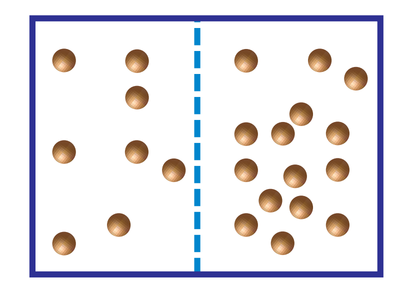




EL TIEMPO

SECCIONES









DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNACIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Menorca, 8, semisót., centro, izda.
28009 Madrid
Tel. 914 097 045
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Angel Garcimartín: *La flecha del tiempo*, *Filosofía del tiempo* y *La máquina del tiempo*; Luis Bou: *De lo instantáneo a lo eterno*, *El tiempo cultural*, *Medición actual del tiempo* y *Aventuras problemáticas*; Esteban Santiago: *El tiempo biológico*; Ignacio Morgado: *El tiempo mental*; Francesc Castelló: *Tiempo y eternidad*; J. Vilardell: *¿Varían las constantes?*, *Hace...*, *Apuntes* y *Curiosidades de la física*



Portada: Tom Draper Design

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	55,00 euro	100,00 euro
Extranjero	80,00 euro	150,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,00 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

LA POLIO EN LA DIANA. «El descubrimiento de un modo de cultivar el virus de la poliomielitis en un tejido orgánico —logrado hace tres años por John F. Enders, Thomas H. Weller y Frederick C. Robbins, del Hospital Infantil de Boston— ha dado un notable impulso al estudio de la enfermedad. Supone el fin de la 'época de los palos de ciego' en la investigación de la poliomielitis y abre caminos para atacar el problema con mucha mayor amplitud. Los métodos de cultivo en tejidos han brindado a los virólogos un sencillo procedimiento *in vitro* para ensayar una multitud de agentes químicos y antibióticos.»

SUEÑO. «El experimento de la Caverna del Mamut permitió al autor y un colega suyo cambiar a voluntad sus ciclos de sueño en ambientes de temperatura y oscuridad constantes, libres de perturbaciones del ciclo normal de vida (*véase la ilustración*). La corteza cerebral puede prolongar el estado de vigilia, pero no sin límites. Dieciséis horas despiertos de cada 24 debe de ser casi el límite de tolerancia psicológica a largo plazo, para la mayoría de nosotros. Pero lo que cuenta es la proporción, no la duración, del tiempo de sueño. Una persona puede adaptarse a una rutina de permanecer levantado 18 horas y dormir nueve, o estar despierto 12 y dormir seis.»

...cien años

VUELO PROPULSADO. «La popularmente conocida como 'máquina voladora' es en verdad una máquina, sin gas que la sostenga, en nada parecida a un globo. Su inventor, Samuel Pierpoint Langley, ha llamado aeródromo (que significa 'mensajero aéreo'). La máquina es centenares de veces más pesada que el aire y se sostiene gracias a otro principio, a saber, la *rapidez* con que surca el aire, como un patinador sobre hielo fino. Los modelos actuales pesan menos de 15 kilogramos, un cuarto de ellos correspondientes al motor y los mecanismos. Este y otros modelos han volado repetidamente distancias del orden un kilómetro a velocidades de unos 30 a 45 kilómetros por hora.»

PREDICCIONES. «En la inauguración de la Exposición de Copenhague se leyó una carta de Thomas A. Edison. Decía: 'Es mi opinión que dentro de treinta años casi en toda línea férrea se habrán descartado las locomotoras de vapor y adoptado motores eléctricos, y que el automóvil eléctrico habrá desplazado casi por completo al caballo. En el estado actual de la ciencia, no hay hechos conocidos que permitan predecirle un futuro comercial a la navegación aérea'.»

EL HABLA DE LOS PECES. «De los peces que emiten sonidos, uno de los más notables que yo haya tenido la suerte de oír fue un ejemplar del género *Haemulon* del Golfo de México —uno de esos pomadásidos de tanto colorido y ancha boca, muy corrientes en los arrecifes—. En cuanto saqué uno del agua empezó a gruñir. 'Oink-oink-oink' profería, y luego un prolongado 'o-i-n-k', sin dejar de mover sus grandes ojos hacia mí con una mirada simpática. Daba la impresión de que aquello representaba un muy primitivo intento de comunicación vocal entre peces.»



La vida en una caverna: En los experimentos sobre los ciclos del sueño, unos se adaptan bien, otros no (1952)

...ciento cincuenta años

CONTRA NATURA. «Afirma lo siguiente el profesor Agassiz, el eminente naturalista: "Imaginan algunos filósofos que los animales extintos hallados en los estratos geológicos más bajos fueron los primeros en ser creados, pero la ciencia moderna invalida esa suposición al revelar que los *estratos más profundos* contienen *radiata, molusca, articulata* y *vertebrata*. El plan que impera hoy en el reino animal es el mismo que se exhibía ya cuando aparecieron los animales sobre la Tierra. El pensamiento que planeó la organización de los animales ahora vivientes es el mismo que los dispuso así desde *el principio*'.»

LOS ANILLOS DE SATURNO. «¿De qué sustancia se componen los anillos de Saturno? Quienes defienden a capa y espada la hipótesis nebular se aferrarían a esta teoría y sostendrían que el planeta y sus anillos estuvieron una vez en estado fluido y que el planeta se enfrió y contrajo desde los anillos. Al menos el anillo más interno es, con toda probabilidad, acuoso. El teniente Matthew F. Maury dice que 'el cinturón de lluvias tropicales circunda la Tierra. Si las nubes suspendidas sobre ese cinturón fueran luminosas y alguien las pudiera observar desde uno de los planetas, presentarían un aspecto no muy distinto al de los anillos de Saturno'.»

APUNTES

ECOLOGIA

Con los ricos

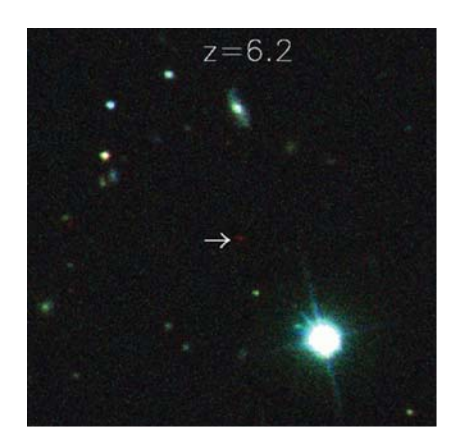
Los pájaros de Phoenix prefieren los parques de las zonas residenciales ricas a los de barriadas más modestas, según Ann P. Kinzig y Paige S. Warren, de la Universidad de Arizona. Aquéllos albergan a lo largo del año una media de 28,2 especies; los de los barrios pobres, en cambio, sólo 17,5; los de clase media se quedan en 23,2. Kinzig y Warren pensaban que la abundancia y variedad del arbolado tenía que ser la causa de esa disparidad. Para su sorpresa, los factores relativos a la vegetación no guardan correlación con los datos que se refieren a las aves: los barrios pobres tenían una mayor diversidad arbórea. La explicación ha de estar en otras variables, ligadas al factor aparente —la categoría socioeconómica—, que puedan influir en las preferencias de los pájaros, así el diseño del entorno o la actividad económica.

—Philip Yam

COSMOLOGIA

Los primeros cuásares

En los últimos años se ha revolucionado la observación de las galaxias remotas, hasta el punto de que ahora se está muy cerca de su origen mismo. Una criba de las imágenes del Estudio Digital de los Cielos Sloan descubría en 2001 el primer cuásar —una galaxia remota y brillantísima— con un desplazamiento *z* al rojo, debido a la expansión del universo, mayor que seis (6,28, en concreto). Este número indica que, en el momento en que se emitió esa luz, el universo tenía unos mil millones de años. Hacía, pues, sólo unos cientos que se habían formado las primeras estrellas y galaxias. Se calcula que el agujero negro que alimentó la emisión de energía de ese cuásar, así como los de los otros tres que se conocen con *z* mayor de 5,7, debía de tener una masa de más de dos o tres mil millones de soles (mil veces mayor que el del centro de la Vía Láctea). Habida cuenta de la juventud por entonces del universo, se contó con poco margen de tiempo para la formación de agujeros de semejante tamaño. Varias magnitudes físicas debieron cumplir unas condiciones verosímiles, pero no triviales. Eso sí, puede que parte de la inmensa luminosidad de al menos alguno de tales cuásares sea sólo aparente, en cuyo caso la masa de su agujero sería menor. El flujo de radiación de alrededor de un tercio de los cuásares con *z* del orden de 6 estaría, como poco, decuplicado a causa de la acción de lente gravitatoria ejercida por galaxias interpuestas entre ellos y nosotros, arguyen Wyithe y Loeb. (Tendría mucho sesgo la distribución estadística de esa magnificación: según el valor de otros parámetros, la mediana caería entre 1,1 y 1,3, la media entre 5 y 50.) Según Haiman y Cen, el cuásar con $z = 6,28$ no estaría magnificado más de cinco veces (a ese límite corresponde un agujero negro de cientos de millones de masas solares). En el espectro de ese remoto objeto se ha visto además, por primera vez, la depresión de Gunn-Peterson: la supresión casi completa de un intervalo de frecuencias contiguo a la principal línea de emisión del hidrógeno del cuásar. ¿Qué interpretación dar a ello? El medio intergaláctico, neutro mientras nacían las galaxias, se reionizó poco después de que el universo alcanzara la edad correspondiente a un *z* de 6,28 (es el hidrógeno neutro de ese medio el que absorbe los fotones). La edad a la que ocurrió la reionización es un parámetro cosmológico clave.



La debilísima imagen óptica en que se identificó el cuásar más lejano conocido hasta ahora. Se seleccionaron los candidatos a cuásar con filtros de color e intensidad, más un análisis de la distribución de energía por píxeles para descartar rayos cósmicos. Luego se confirmó la existencia del cuásar espectroscópicamente

NASA/CXC/PSU/N. BRANDT *et al.*

COMPUTACION Y RELATIVIDAD GENERAL

El ordenador que viaja por el tiempo

La posibilidad de curvas cerradas en el tiempo que transmitan información es más que dudosa. Pero Todd A. Brun ha imaginado un ordenador que utilizaría una curva así para resolver, como por arte de magia, problemas inasequibles, por ejemplo factorizar un número **N** muy grande. Para encontrar un divisor de **N** el programa probaría con todos los enteros, uno a uno. Supongamos que en el instante **t** el ordenador está probando con el número **p**. Si no es divisor de **N**, se le suma 1, y así sucesivamente hasta alcanzar un valor $\mathbf{p}^*$ que sí lo sea. El proceso llevará su tiempo, quizás una inmensidad de tiempo, pero ahí interviene la curva cerrada: transfiere el valor $\mathbf{p}^*$ al pasado, al instante **t,** y lo carga entonces en el registro por cuyo valor se va dividiendo **N**. Claro está, $\mathbf{p}^*$ será divisor de **N**, ahora en el instante **t**, ¡pero partimos de que el número que en ese momento se probaba era **p**, que no lo era! No cabe tal incoherencia; por tanto, $\mathbf{p} = \mathbf{p}^*$ en **t**. ¡El algoritmo habrá resuelto el problema sin que haya que ejecutarlo! Brun concluye que esta es una razón para considerar aún más improbable la existencia de curvas cerradas en el tiempo que transmitan información.

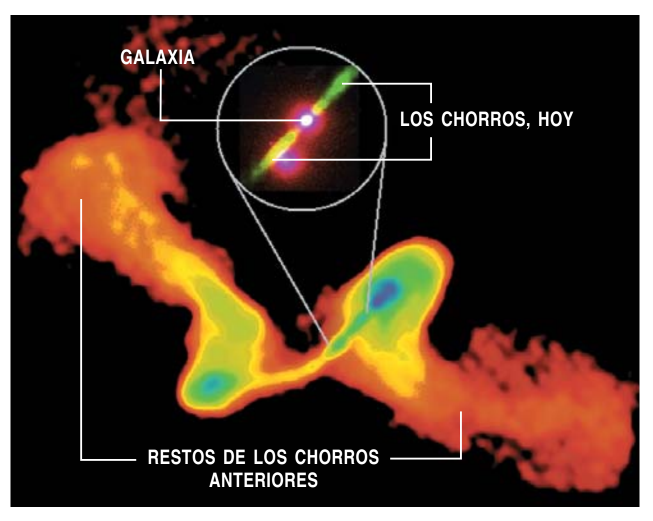
ASTROFISICA

Cuando dos agujeros negros se juntan

Aunque se ha estado dando por sentado que, cuando dos galaxias chocan, los agujeros negros de sus núcleos se unen, no se había encontrado prueba alguna de que así fuera. Ahora, David R. Merritt y Ronald D. Ekers sostienen en *Science* que las extrañas configuraciones de los chorros, potentes radiofuentes, que emanan de las galaxias activas llevan la impronta de tales fusiones celestes.

Se cree que los chorros, emitidos al caer en espiral la materia en un agujero negro, corren paralelos al eje de rotación de éste. Infieren esos dos astrofísicos que hasta un agujero negro pequeño haría que su compañero mayor rotase al ir los dos a unirse, con lo cual los chorros pasarían de presentar forma de I a tenerla de X distorsionada. Dado el número de galaxias que exhiben esas características y los cien millones de años de vida de los chorros, calculan que se produce una fusión de agujeros al año, información de utilidad para quienes abogan por los detectores de ondas gravitatorias.

—*JR Minkel*



OBSERVATORIO NACIONAL DE RADIOASTRONOMIA/AUI/ SPACE TELESCOPE SCIENCE INSTITUTE

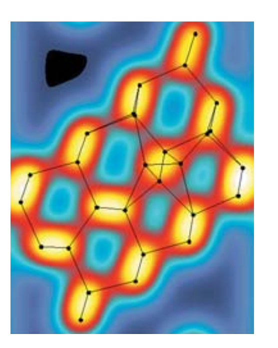
La fusión de dos agujeros negros quizá haya desplazado los chorros de la radiogalaxia NGC 326. En un principio debían de apuntar a las 10 y a las 4; ahora lo hacen a las 8 y a las 2

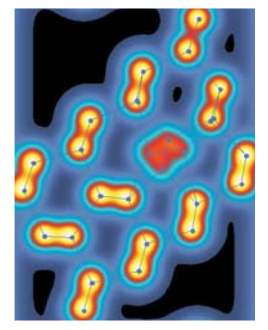
OPTICA

Sin aberración

Como las lentes ópticas, las lentes magnéticas de los microscopios electrónicos sufren imperfecciones que enturbian las imágenes. Ahora, como se informa en *Nature*, sendos equipos del centro de investigación Watson de IBM de Yorktown Heights (Nueva York) y de Nion R&D, en Kirkland (Washington), han empleado lentes múltiples y unos refinados programas para contrarrestar el más grave de esos defectos: la aberración esférica. El haz electrónico resultante es menos ancho que un átomo de hidrógeno; facilita la formación directa de imágenes de estructuras menores que un angstrom (un nanómetro). Conforme menguan las dimensiones de los microcircuitos de ordenador, los científicos necesitan de esa resolución para observar y localizar defectos de los materiales a nivel atómico, como, por ejemplo, la ausencia o el exceso de átomos en su estructura. Estudios precedentes habían ofrecido sólo vislumbres borrosos de dichos defectos.

—*JR Minkel*





IBM; ILUSTRACIONES DE MATT COLLINS

Resolución: Una vez corregida la aberración esférica, los átomos de silicio aparecen con mayor nitidez (izquierda) *que sin la corrección* (derecha)

INFORMATICA Y MUSICA

Sin cuerdas

Los instrumentos musicales computarizados suelen recurrir a un MIDI (acrónimo en inglés de interfaz digital para instrumentos musicales) a fin de transformar las vibraciones mecánicas en información, que un programa convertirá en sonido. Sorprende cuán insensibles se muestran esos instrumentos a los movimientos sutiles de la mano del músico; además, pocos ofrecen una reacción háptica (táctil), crucial para una interpretación precisa y expresiva. Charles Nichols, antes en la Universidad de Stanford y ahora profesor de composición y técnica musical en la Universidad de Montana, ha desarrollado un arco de violín computarizado que ofrece una sensación comparable a la de los arcos tradicionales. El vBow, como lo llama Nichols, es una varilla de fibra de vidrio que corre por una ranura conectada a un chasis en forma de violín. Servomotores y cables imitan fielmente la reacción háptica habitual de los violines; sensores de alta resolución captan los detalles finos de la interpretación. Pero Nichols, antes de que pueda crear una música de ordenador más expresiva, tendrá que desarrollar las cuerdas y la caja correspondientes; espera completar un violín virtual en pocos años.

—*Steven Ashley*

El arco virtual de violín ofrece las mismas sensaciones que su pariente real

CHARLES NICHOLS

La flecha del tiempo

Todo parece indicar que el tiempo corre inexorablemente, del pasado inmutable hacia el incierto futuro, pasando por el presente tangible. Pero eso es mera ilusión

Paul Davies

"Recoge tus rosas mientras puedas,/pasa el tiempo y nada queda", escribía Robert Herrick, poeta inglés del siglo XVII, plasmando ese sentimiento general de que el tiempo vuela. ¿Y quién dudaría de ello? El paso del tiempo expresa, probablemente, la sensación más honda de la percepción humana, pues vivimos su transcurso fugaz con una intensidad mayor que la que experimentamos con las percepciones del espacio o masa. Se ha comparado el discurrir del tiempo al vuelo de una flecha y al flujo sin retorno de un río, que nos lleva inexorablemente del pasado al futuro. Shakespeare hablaba del "molinillo del tiempo"; su paisano Andrew Marvell, del "alado carruaje del tiempo que se mueve con presteza".

Por evocativas que resulten estas imágenes, celan una demoledora y profunda paradoja. Nada hay en la física conocida que corresponda al paso del tiempo; en su marco conceptual, el tiempo no transcurre, sino que simplemente es. Algunos filósofos sostienen que la misma noción del paso del tiempo carece de sentido y que la metáfora del río o del flujo del tiempo deriva de una idea errónea. Pero, ¿cómo puede ocurrir que algo tan enraizado en nuestra experiencia del mundo resulte ser falso? ¿Esconde acaso el tiempo una cualidad fundamental que se le ha escapado a la ciencia?

Tiempo tripartito

En nuestro desenvolvimiento diario dividimos el tiempo en tres partes: pasado, presente y futuro. Esta distinción básica constituye el quicio de la estructura gramatical del lenguaje. Asociamos la realidad con el momento presente. Pensamos que lo pasado abandonó el mundo de lo existente, mientras que el futuro se adivina en sombra. En este cuadro tan simple, el "ahora" de nuestra cognición consciente se desliza sin cesar hacia delante, transformando los sucesos de un futuro informe en la realidad, tangible aunque efímera, del presente, y de aquí los relega al pasado inmutable.

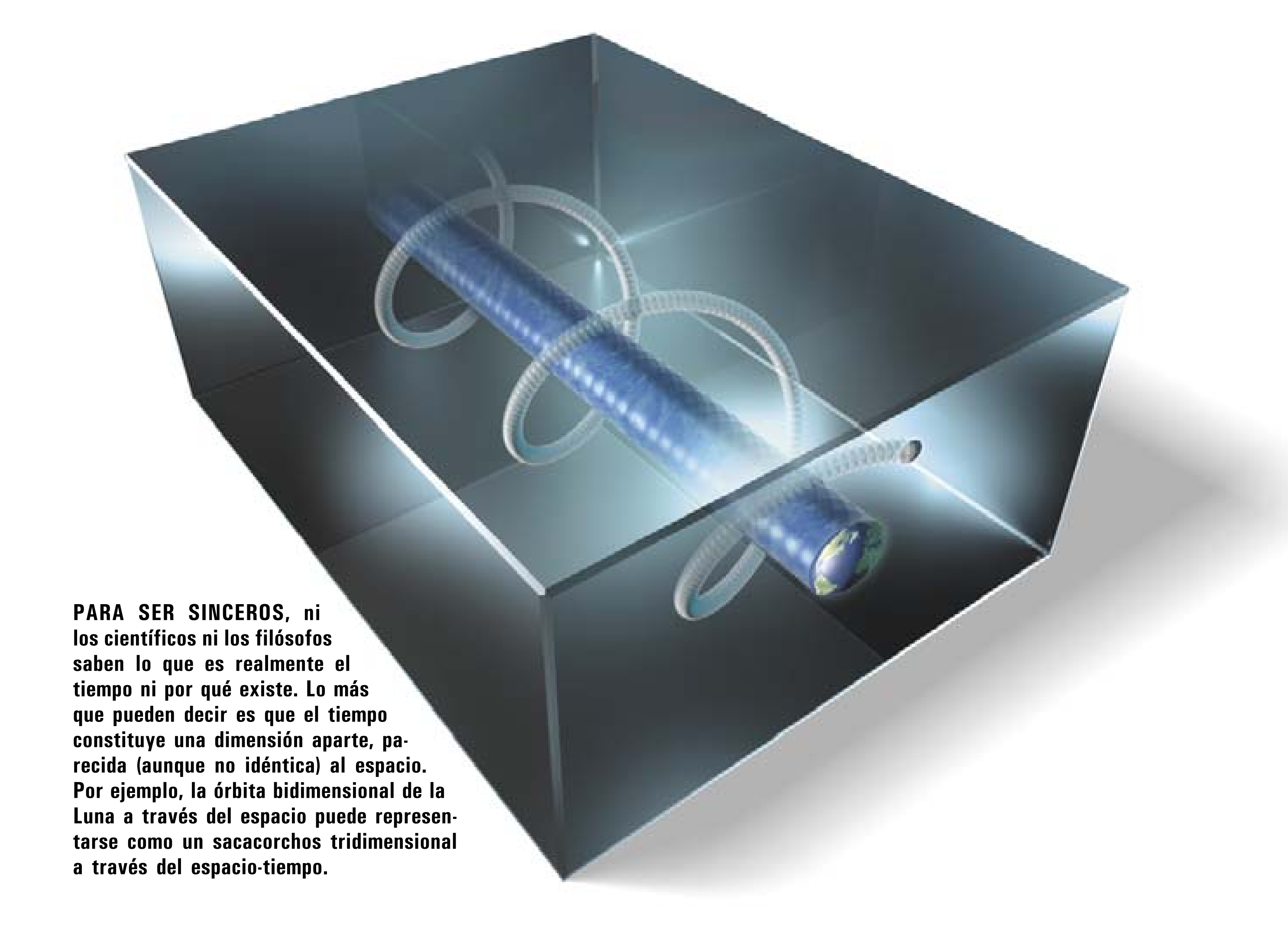
Por evidente que parezca esta exposición de sentido común, se opone, de plano, a los pronunciamientos de la física. Lo expresaba en famoso aforismo Albert Einstein: "Pasado, presente y futuro son sólo ilusiones, aunque sean ilusiones pertinaces". La sorprendente conclusión que comunicaba así a un amigo se colegía directamente de su teoría especial de la relatividad, que despoja al momento presente de cualquier significado absoluto o universal. En el marco de esa teoría, la simultaneidad es relativa. Dos sucesos que tengan lugar en el mismo momento si se observan desde un sistema de referencia, pueden ocurrir en momentos distintos si se contemplan desde otro.

Una cuestión banal, como "¿qué está ocurriendo ahora en Marte?", carece de respuesta concluyente. En la nuez de esa pregunta se halla la separación de la Tierra y Marte, que distan unos 20 minutos luz. Puesto que la información no puede viajar más rápido que la luz, un observador instalado en nuestro planeta es incapaz de conocer la situación ese mismo instante en Marte. Debe inferir la respuesta tras el suceso, una vez que la luz haya podido viajar de uno a otro planeta. La inferencia sobre dicho evento dependerá de la velocidad del observador.

Así, en una posible expedición tripulada a Marte, los controladores en la Tierra podrían preguntarse: "A saber qué estará haciendo ahora el comandante Jones en la Base Alfa". Tras consultar el reloj y ver que son las 12 del mediodía en Marte, podrían concluir: "Estará comiendo". Pero un astronauta que viajara cerca de la Tierra a una velocidad cercana a la de la luz en el mismo instante podría afirmar —mirando su reloj— que la hora en Marte pasaba de las 12 o aún no llegaba, dependiendo del sentido de su movimiento. La respuesta de ese astronauta a la cuestión de lo que estaba haciendo Jones sería

El autor

PAUL DAVIES es físico teórico del Centro Australiano de Astrobiología de la Universidad de Macquarie en Sydney. Muy conocido por su obra divulgadora de la ciencia, centra su interés investigador en los agujeros negros, teoría cuántica de campos y origen del universo.



PARA SER SINCEROS, ni los científicos ni los filósofos saben lo que es realmente el tiempo ni por qué existe. Lo más que pueden decir es que el tiempo constituye una dimensión aparte, parecida (aunque no idéntica) al espacio. Por ejemplo, la órbita bidimensional de la Luna a través del espacio puede representarse como un sacacorchos tridimensional a través del espacio-tiempo.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

"preparando la comida" o "lavando los platos". Tales discrepancias ponen en ridículo cualquier intento de conferir una preeminencia especial al momento presente, pues ¿a qué "ahora" se refiere ese momento? Si usted y yo nos encontráramos en movimiento relativo, un suceso que yo dictaminara que pertenece al todavía incierto futuro podría existir ya para usted en el pasado inmutable.

La conclusión más llana es que tanto pasado como futuro están fijados. Por esta razón, los físicos prefieren asumir que el tiempo está desplegado ya en su completitud —una suerte de paisaje temporal, análogo al espacial— con los sucesos del pasado y del futuro colocados allí todos juntos. Concepto que se suele denominar entramado del tiempo. Esta descripción carece por completo de un momento especial privilegiado, tal que el presente, o de cualquier proceso que convierta sistemáticamente los sucesos futuros en presentes y luego en pasados. En suma, el tiempo de los físicos ni transcurre ni fluye.

Irrealidad del flujo, realidad del tiempo

A lo largo de los años, ciertos filósofos han llegado a la misma conclusión considerando lo que habitualmente queremos decir con la expresión transcurso del tiempo. Afirman que la noción carece de coherencia interna. El concepto de flujo, después de todo, se refiere al movimiento. Tiene sentido hablar del movimiento de un objeto físico, como el de una flecha por el aire, midiendo su cambio de posición con el tiempo. Pero, ¿qué significado puede conferirse al movimiento mismo del tiempo? ¿Respecto a qué se mueve? Mientras que otros tipos de movimiento relacionan un proceso físico con otro, el supuesto flujo del tiempo relaciona el tiempo consigo mismo. Plantearse la simple cuestión de cuán rápido pasa el tiempo pone al descubierto el absurdo de la idea en sí. La respuesta trivial de "un segundo por segundo" no nos dice absolutamente nada.

Aunque nos resulta conveniente referirnos al transcurso del tiempo en los asuntos cotidianos, la noción no aporta ninguna información que no pudiera ser expresada sin ella. Considérese la siguiente situación: *Alicia ansiaba unas navidades blancas, pero cuando llegó el día quedó desilusionada porque sólo llovía; sin embargo, se alegró de que nevara al día siguiente*. Pese a que esta descripción aparece repleta de tiempos verbales y de referencias al transcurrir del tiempo, la misma información se expresa simplemente correlacionando los estados mentales de Alicia con fechas, omitiendo toda referencia al paso del tiempo o a los cambios del mundo. Así, el siguiente catálogo de los hechos, aunque rudo y seco, basta:

24 de diciembre: *Alicia ansía unas navidades blancas.*
25 de diciembre: *Llueve. Alicia está desilusionada.*
26 de diciembre: *Nieva. Alicia está contenta.*

En esta descripción nada cambia, nada transcurre. Simplemente se dan estados del mundo en diferentes fechas y, asociados, estados mentales de Alicia.

Datan de los filósofos griegos Parménides y Zenón argumentos similares. Hace un siglo, John McTaggart intentó trazar una clara distinción entre la descripción del mundo en términos de sucesos que ocurren, a lo que el filósofo británico denominó serie A, y la descripción en términos de fechas correlacionadas con estados del mundo, la serie B. Cada una de ellas da la impresión de describir correctamente la realidad; sin embargo, ambos relatos parecen contradictorios. Por ejemplo, el suceso "Alicia está desilusionada" formó parte del futuro, luego del presente y, por último, del pasado. Pero pasado, presente y futuro son categorías exclusivas, así que ¿cómo podría un suceso singular tener la característica de pertenecer a las tres? McTaggart aprovechó la disparidad entre las series A y B para rebatir la misma realidad del tiempo, una conclusión quizá demasiado radical. La mayoría de los físicos lo plantearía de manera menos drástica: el flujo del tiempo es irreal, pero el tiempo mismo es tan real como el espacio.

Flecha del tiempo

Una fuente de confusión al estudiar el paso del tiempo proviene de su conexión con la llamada flecha del tiempo. Negar el flujo del tiempo no es lo mismo que afirmar que las designaciones "pasado" y "futuro" carezcan de fundamento físico. Los sucesos del mundo forman innegablemente una secuencia unidireccional. Un huevo que caiga al suelo se romperá en pedazos, pero no veremos nunca el proceso inverso: que el huevo roto se recomponga espontáneamente en un huevo entero. Este es un ejemplo de la segunda ley de la termodinámica, según la cual la entropía de un sistema cerrado —lo que define aproximadamente su grado de desorden— tiende a aumentar con el tiempo. El huevo intacto tiene menos entropía que el cascado o roto.

En la naturaleza abundan los procesos físicos irreversibles. Por eso, la segunda ley de la termodinámica cumple una función principal: impone al mundo una asimetría tajante entre las direcciones del eje del tiempo hacia el pasado y hacia el futuro. Por convención, la flecha del tiempo apunta hacia el futuro. Eso no implica, sin embargo, que la flecha se mueva hacia el futuro, de la misma manera que la aguja de la brújula señalando el norte no indica tampoco que la brújula se mueva hacia el norte. Ambas flechas simbolizan una asimetría, no un movimiento. La flecha del tiempo denota una asimetría del mundo *en el* tiempo, no una asimetría o flujo *del* tiempo. Los epítetos "pasado" y "futuro" pueden aplicarse legítimamente a las direcciones temporales, de igual modo que "arriba" y "abajo" pueden aplicarse a unas direcciones espaciales, pero puntualizar *el* pasado o *el* futuro es tan carente de significado como especificar el arriba o el abajo.

La distinción entre "estar en pasado" o "estar en futuro" y "el" pasado o "el" futuro queda ilustrada si nos imaginamos una película, en la cual —supongamos— un huevo se estrella contra el suelo y se rompe. Si la filmación se proyectara hacia atrás, todos juzgarían que la secuencia es irreal. Imaginemos que el carrete de película se cortara en fotogramas que luego se barajaran. Sería una tarea sencilla para cualquiera volverlas a colocar en orden en un montón, con el huevo roto encima del todo y el huevo intacto abajo. Este apilamiento vertical retiene la asimetría implícita en la flecha del tiempo porque forma una secuencia ordenada en el espacio vertical, lo que prueba que la asimetría del tiempo es realmente una propiedad de los estados del mundo, no una propiedad del tiempo en cuanto tal. No es necesario pasar la película para discernir la flecha del tiempo.

Dado que la mayoría de los análisis físicos y filosóficos del tiempo no son capaces de poner de manifiesto signo alguno de flujo temporal, nos quedamos envueltos en un halo de misterio. ¿A qué deberíamos atribuir la profunda y universal impresión de que el mundo se halla en un continuo estado de flujo? Algunos investigadores, entre los que sobresale el químico Ilya Prigogine, ganador del premio Nobel y actualmente en la Universidad de Texas, han sugerido que la sutil física de los procesos irreversibles convierte el flujo del tiempo en un aspecto objetivo del mundo. Pero yo y otros más pensamos que se trata de algún tipo de ilusión.

Después de todo, no observamos realmente el transcurso del tiempo. Lo que de hecho observamos es que los estados más recientes del mundo difieren de los estados previos que todavía recordamos. El hecho de que recordemos el pasado, y no el futuro, es una observación no del transcurso del tiempo sino de la asimetría temporal. Sólo el observador consciente re-

NADIE SABE REALMENTE...

¿Qué viene a ser el tiempo?

SAN AGUSTÍN DE HIPONA, teólogo famoso del siglo V, señalaba que sabía qué era el tiempo, hasta que alguien se lo preguntaba. Entonces le faltaban palabras para explicarlo. Como tenemos una sensación del tiempo psicológica, las definiciones del tiempo basadas en la física nos parecen áridas e inadecuadas. Para los físicos, el tiempo es simplemente lo que —con exactitud— miden los relojes. Para los matemáticos, un espacio unidimensional, por lo general supuesto continuo, aunque podría estar cuantizado en "cronones" discretos, al modo de los fotogramas de una película.

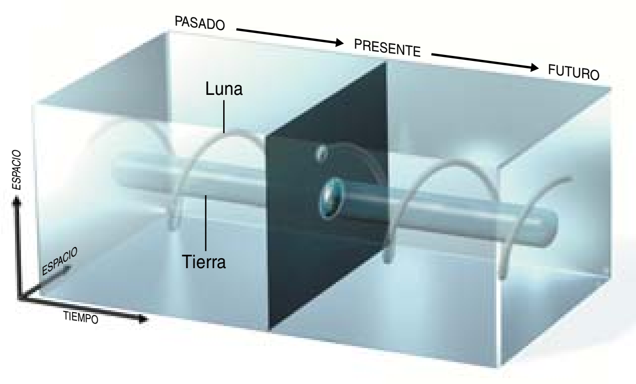
El hecho de que el tiempo pueda tratarse como una cuarta dimensión no significa que sea idéntico a las tres dimensiones del espacio. El tiempo y el espacio entran en nuestra experiencia cotidiana y en la teoría física de distinta manera. Así, la fórmula para calcular las distancias espaciotemporales no es la misma que la empleada para calcular distancias espaciales. La distinción entre espacio y tiempo subyace bajo la noción capital de causalidad, impidiendo que causa y efecto se entremezclen sin remedio. Por otra parte, muchos físicos creen que, en la escala más ínfima de tamaño y duración, podrían el espacio y el tiempo perder sus identidades diferenciadas.

EL ENTRAMADO DEL TIEMPO

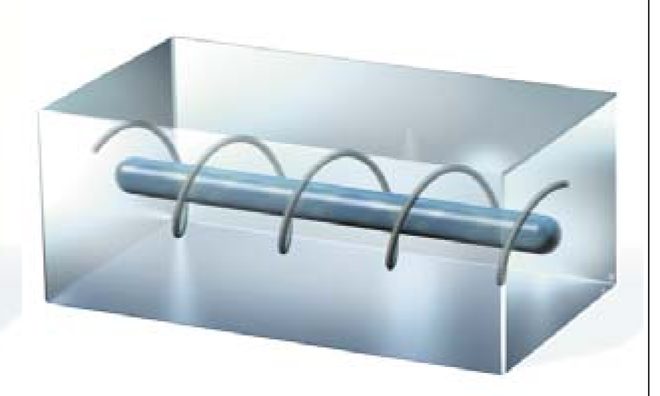
Cualquier momento es como el presente

A TENOR DEL SENTIDO COMÚN, el momento presente tiene un significado especial. Lo que es real, está en el presente. Conforme el reloj avanza, el momento pasa y otro entra en la existencia: un proceso al que llamamos el transcurrir del tiempo. La Luna, por ejemplo, se encuentra en una posición de su órbita alrededor de la Tierra. Con el tiempo, deja de ocupar esa posición para hallarse en otra.

Los investigadores que reflexionan sobre el particular suelen aducir que no hay manera de singularizar un momento presente en especial, pues todo momento se considera a sí mismo especial. Objetivamente, el pasado, el presente y el futuro deben ser igualmente reales. Toda la eternidad está desplegada en un entramado de cuatro dimensiones compuesto del tiempo y las tres dimensiones espaciales. (Este diagrama sólo muestra dos de las dimensiones espaciales.)




OPINION CONVENCIONAL: sólo el presente es real



EL ENTRAMADO DEL TIEMPO: todos los instantes son igualmente reales

BRYAN CHRISTIE DESIGN

gistra el paso del tiempo. Un reloj mide duraciones entre sucesos en el mismo sentido en que una cinta métrica mide distancia entre lugares; no mide la "velocidad" con la que a un momento le sucede otro. Resulta, pues, manifiesto que el flujo del tiempo es subjetivo, no objetivo.

Vivir en el presente

Esta ilusión demanda una explicación, que deberá buscarse en la psicología, la neurofisiología y quizás en la lingüística o la cultura. La ciencia apenas si ha comenzado a considerar la cuestión de nuestra percepción del paso del tiempo; sólo podemos especular cuál sea la respuesta. Podría tener que ver con el funcionamiento del cerebro. Si uno gira sobre sí mismo varias veces y se detiene de repente, se siente aturdido. Subjetivamente, parece como si el mundo estuviera girando en torno a nosotros, pero los ojos nos muestran con claridad que no es así. El movimiento aparente de lo que tenemos a nuestro alrededor es una ilusión creada por la rotación de fluido en el oído interno. Quizás el flujo del tiempo sea similar.

Existen dos aspectos de la asimetría temporal que podrían crear la falsa impresión de que el tiempo pasa. El concepto de entropía —los físicos se han percatado de ello en los últimos decenios— está estrechamente relacionado con la cantidad de información de un sistema. Por esta razón, el almacenamiento de recuerdos es un proceso unidireccional: los nuevos recuerdos añaden información y aumentan la entropía del cerebro. Pudiera ser que percibiéramos esta unidireccionalidad como fluir del tiempo.

Una segunda posibilidad es que nuestra percepción del flujo del tiempo se halle ligada a la mecánica cuántica. Ya en los primeros días de la formulación de la mecánica cuántica se apreció que el tiempo entra en la teoría de una manera específica, bastante diferente del espacio. La particularidad del ingrediente temporal es una de las razones por las que está resultando tan difícil aunar la mecánica cuántica con la relatividad general. El principio de indeterminación de Heisenberg, según el cual la naturaleza es inherentemente indeterminada, implica un futuro abierto (y, para el caso, un pasado abierto). Este indeterminismo se manifiesta de manera sobresaliente a una escala de tamaños atómica y dicta que las propiedades observables que caracterizan un sistema físico en general no están determinadas en el paso de un momento a otro.

Por ejemplo, un electrón que incida sobre un átomo puede rebotar en una dirección entre muchas, y normalmente es imposible predecir con antelación cuál será el resultado en cualquier caso específico. El indeterminismo cuántico implica que, para un estado cuántico particular, existen muchos futuros alternativos o realidades posibles (infinitas, quizá). La mecánica cuántica proporciona las probabilidades relativas para cada resultado observable, aunque no indica cuál de los posibles futuros se hará real.

Pero cuando un observador humano realiza una medición, se obtiene un resultado y sólo uno; por ejemplo, se encontrará que el electrón rebotado se mueve en

Todo es relativo

¿QUÉ ESTÁ SUCEDIENDO EN MARTE AHORA MISMO? Una cuestión muy simple para una respuesta harto complicada. El brete resulta de la expresión "ahora mismo". Personas diferentes que se muevan a distinta velocidad tendrán percepciones dispares de lo que es el instante actual. Este extraño hecho se conoce como relatividad de la simultaneidad. En la situación abajo ilustrada, dos personas —un terrícola sentado en Houston y un navegante espacial surcando el sistema solar al 80 por ciento de la velocidad de la luz— intentan responder a la cuestión de lo que está sucediendo en Marte ahora mismo. Un residente en Marte ha accedido a comenzar su almuerzo cuando su reloj dé las 12 del mediodía y transmitir una señal en ese momento.

Visto desde la Tierra

Desde la perspectiva del terrícola, la Tierra se mantiene en reposo, Marte se halla a una distancia constante (20 minutos luz) de la Tierra y la nave espacial avanza al 80 por ciento de la velocidad de la luz. La situación le parece al marciano exactamente la misma.

Antes del mediodía: Intercambiando señales luminosas, el terrícola y el marciano miden la distancia mutua y sincronizan sus relojes.

12 del mediodía: El terrícola supone que el marciano ha comenzado el almuerzo. Se prepara para esperar 20 minutos y verificarlo.

12 horas, 11 minutos: Conociendo la velocidad de la nave espacial, el terrícola se encuentra con la señal en su trayectoria a Marte.

12 horas, 20 minutos: La señal llega a la Tierra. El terrícola confirma su hipótesis anterior. El mediodía en Marte coincide con el mediodía en la Tierra.

12 horas, 25 minutos: La nave espacial llega a Marte.



Visto desde la nave espacial

Desde el punto de vista del astronauta, la nave está en reposo. Son los planetas los que surcan el espacio al 80 por ciento de la velocidad de la luz. Sus mediciones muestran que los dos planetas están separados por 12 minutos luz (una distancia diferente de la inferida por el terrícola). A esta discrepancia, un efecto bien conocido de la teoría de Einstein, se la denomina contracción de longitudes. Un efecto relacionado, la dilatación de tiempos, provoca que los relojes de la nave y los planetas marchen a diferente ritmo. (El terrícola y el marciano piensan que el reloj de la nave se retrasa; el astronauta piensa que los que se retrasan son los relojes de los planetas.) Conforme sobrevuela la Tierra, sincroniza su reloj con el de la Tierra.

Antes del mediodía: Intercambiando señales luminosas con sus colegas, el astronauta mide la distancia entre los planetas.

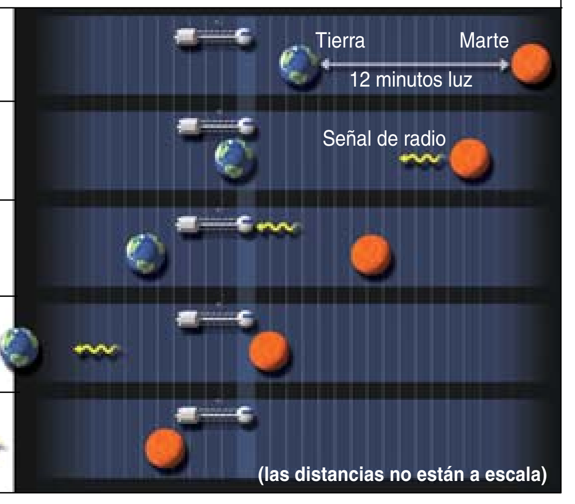
12 del mediodía: Al sobrevolar la Tierra, el astronauta supone que el marciano ha comenzado el almuerzo. Se prepara para esperar 12 minutos y verificarlo.

12 horas, 7 minutos: Llega la señal, invalidando la suposición. El astronauta infiere que el marciano comenzó a almorzar antes del mediodía (hora de la nave).

12 horas, 15 minutos: Marte llega a la nave. El astronauta y el marciano se dan cuenta de que sus relojes no están sincronizados, pero no se ponen de acuerdo en cuál sea el correcto.

12 horas, 33 minutos: La señal llega a la Tierra. Las discrepancias de los relojes demuestran que no existe un momento presente universal.





BRYAN CHRISTIE DESIGN

Resumen

- Nuestros sentidos nos indican que el tiempo discurre: que el pasado es inmutable, el futuro es indeterminado y la realidad existe en el tiempo presente. Pero varios argumentos físicos y filosóficos proponen un planteamiento muy distinto.
- El paso del tiempo es probablemente una ilusión. En la conciencia podrían intervenir procesos termodinámicos o cuánticos que ofrecieran la impresión de vivir momento a momento.

cierta dirección. En el acto de la medición, se proyecta de entre un vasto conjunto de posibilidades una realidad específica y particular. En la mente del observador, lo posible realiza una transición a lo real, el futuro abierto al pasado fijo, que es precisamente lo que queremos expresar con el paso del tiempo.

No hay consenso entre los físicos sobre cómo tiene lugar esta transición de muchas realidades posibles a una realización particular. Se ha argumentado que tiene algo que ver con la conciencia del observador, basándose en que es el hecho de la observación lo que provoca en la naturaleza esta sensación. Roger Penrose, de la Universidad de Oxford, mantiene que la conciencia —que incluye las impresiones del flujo temporal— podría estar relacionada con procesos cuánticos del cerebro.

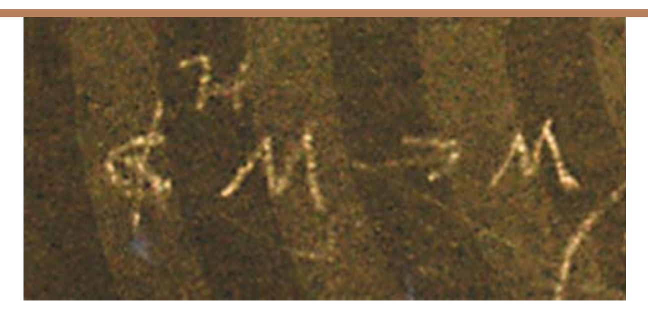
Aunque los investigadores no han hallado pruebas de la existencia de un "órgano del tiempo" en el cerebro, a la manera de la corteza visual, por poner un ejemplo, pudiera ser que algún trabajo futuro localizara los procesos cerebrales responsables de nuestra impresión del paso del tiempo. Y total, ¿qué ocurriría si la ciencia fuera capaz de dar cuenta del transcurso del tiempo? Quizá ya no nos inquietaríamos más por el futuro, ni nos lamentaríamos por el pasado. Las preocupaciones acerca de la muerte podrían volverse tan irrelevantes como las preocupaciones por el nacimiento. La ansiedad y la nostalgia desaparecerían del vocabulario humano. Sobre todo, el sentido de urgencia asociado a tantas actividades humanas se disiparía. Ya no seríamos esclavos de la exhortación de Henry Wadsworth Longfellow a "actuar, actuar en el presente vivido", pues el pasado, el presente y el futuro serían literalmente cosas del pasado.

Bibliografía complementaria

THE PHYSICS OF TIME ASYMMETRY. Paul Davies. University of California Press, 1974.

TIME AND BECOMING. J. J. C. Smart en *Time and Cause*. Dirigido por Peter van Inwagen. Reidel Publishing, 1980.

ABOUT TIME: EINSTEIN'S UNFINISHED REVOLUTION. Paul Davies. Simon & Schuster, 1995.





Filosofía del tiempo

El tiempo, que se les escapa a los físicos, ¿podrían ayudar a explicarlo los filósofos?

George Musser

Lo más misterioso del tiempo es que siempre parece que nos falta. Por si sirve de consuelo, eso mismo les pasa a los físicos. Las leyes de la física contienen una variable que corresponde al tiempo, mas no incorpora aspectos capitales del tiempo tal como lo vivimos; en especial, la distinción entre pasado y futuro. Y conforme se intenta formular leyes más fundamentales, la pequeña *t* se evapora del todo. Frustrados, muchos físicos recurren a una fuente que les resulta poco familiar: los filósofos.

¿Que les ayuden los filósofos? A la mayoría de los físicos les suena a extravagancia. Lo más cerca que llegan a estar algunos de la filosofía es a última hora de la noche, conversando frente a unas cañas. Incluso los que han leído filosofía en serio dudan, por lo general, de que sea útil; tras una docena de páginas de Kant, la filosofía comienza a parecer algo así como lo ininteligible en busca de lo indeterminado. "A decir verdad, creo que a la mayoría de mis colegas les amilana hablar con filósofos; es como si les pillaran saliendo de una sala X", dice el físico Max Tegmark, de la Universidad de Pennsylvania.

Pero no siempre fue así. Los filósofos desempeñaron un cometido crucial en otras revoluciones científicas del pasado, entre ellas el desarrollo de la mecánica cuántica y la relatividad a principios del siglo XX. Una nueva revolución está hoy en marcha: los físicos intentan combinar esas dos doctrinas en una teoría de la gravedad cuántica, que tendrá que reconciliar dos concepciones muy dispares del espacio y el tiempo. Carlo Rovelli, de la Universidad de Aix-Marsella, uno de los más destacados en el empeño, dice: "Las contribuciones de los filósofos a la nueva comprensión del espacio y del tiempo en la gravedad cuántica serán muy importantes."

Dos ejemplos ilustran cómo físicos y filósofos han ido aunando recursos. El primero concierne al "problema del tiempo congelado", conocido también, simplemente, como el "problema del tiempo". Surge cuando los teóricos intentan convertir la teoría de la relatividad general de Einstein en una teoría cuántica, utilizando un procedimiento llamado cuantización canónica. El procedimiento funcionó cuando se aplicó a la teoría del electromagnetismo, pero en el caso de la relatividad da lugar a una ecuación (la de Wheeler-DeWitt) que carece de variable temporal. Tomada al pie de la letra, la ecuación indica que el universo debería estar congelado en el tiempo, inmutable para siempre.

Covariancia

Este lamentable corolario quizá refleje un fallo en el procedimiento mismo, pero algunos físicos y filósofos sostienen que posee raíces más profundas, que se hunden en uno de los principios fundamentales de la relatividad: la covariancia general, que mantiene que las leyes de la física son las mismas para todos los observadores. Los físicos se representan este principio en términos geométricos. Dos observadores percibirán conformaciones diferentes del espacio-tiempo, correspondientes a la distinta visión que tendrán de quién se mueve y qué fuerzas actúan. Cada conformación es una versión, distorsionada cuanto se quiera pero con suavidad, sin roturas, de la otra, en el mismo sentido en que una taza de café es una versión distorsionada, sin fracturas, de una rosquilla deformada. La covariancia general establece que la diferencia entre ambas visiones no significa nada. Por lo tanto, dos conformaciones cualesquiera serán físicamente equivalentes.

A finales del decenio de 1980, los filósofos John Earman y John D. Norton, de la Universidad de Pittsburgh, argumentaron que la covariancia general tiene consecuencias sorprendentes para una vieja cuestión metafísica: el espacio y el tiempo, ¿existen con inde-





pendencia de las estrellas, las galaxias y el resto de sus contenidos (una postura conocida como sustantivismo) o son meramente un concepto artificial que describe cómo se relacionan los objetos (relacionismo)? En palabras de Norton: "¿Son como el lienzo de un pintor, que existe tanto si el artista pinta en él como si no? ¿O se asemejan a la paternidad, que no existe sino cuando hay padres e hijos?".

Norton y Earman trajeron a colación un experimento mental de Einstein, largo tiempo olvidado. Considérese una porción vacía de espacio-tiempo. Fuera de este agujero la distribución de materia fija la geometría del espacio-tiempo por medio de las ecuaciones de la relatividad. Dentro, sin embargo, la covariancia general permite que el espacio-tiempo asuma una forma cualquiera de entre una variedad. En cierto sentido, el espacio-tiempo se comporta como el lienzo de un cuadro. Los palos de una tienda de campaña, que representan la materia, fuerzan a la tela a adquirir cierta forma. Pero si se quita uno de esos puntales, lo que viene a ser como crear un agujero, parte de la tienda se combará, se vendrá abajo o la agitará el viento de manera impredecible.

Dejando de lado los matices, el experimento mental plantea un dilema. Si el continuo es un ente por derecho propio (como sostiene el sustantivismo), la relatividad general ha de ser indeterminista (es decir, su descripción del mundo deberá contener un elemento de aleatoriedad). Y si la teoría es determinista, el espacio-tiempo deberá ser pura ficción (como sostiene el relacionismo). A primera vista, parece una victoria del relacionismo. Apoya este argumento que otras teorías, como el electromagnetismo, estén basadas en simetrías que guardan cierto parecido con el relacionismo.

Pero el relacionismo no se halla exento de puntos débiles. Es la causa última del problema del tiempo congelado: puede que el espacio se vaya transformando con el tiempo, pero si sus muchas conformaciones son equivalentes, nunca cambia realmente. Además, el relacionismo se opone al cimiento sustantivista de la mecánica cuántica. Si el espacio-tiempo no tiene un significado fijo, ¿cómo se pueden hacer observaciones en momentos y lugares específicos, conforme parece requerir la mecánica cuántica?

Diferentes desenlaces del dilema dan lugar a teorías dispares de la gravedad cuántica. Algunos físicos, como Rovelli y Julian Barbour, intentan un enfoque relacionista; piensan que el tiempo no existe y han buscado la manera de explicar el cambio como una ilusión. Otros, entre los que se cuentan quienes propugnan la teoría de cuerdas, se inclinan por el sustantivismo.

"Es un buen ejemplo del valor de la filosofía en la física", dice el filósofo Craig Callender, de la Universidad de California en San Diego. "Si los físicos piensan que el problema del tiempo en la gravedad cuántica canónica es un asunto meramente cuántico, estarán socavando su comprensión del mismo; ya lo padecíamos hace mucho, y es más general".

Vivir de la entropía

Un segundo ejemplo de las contribuciones de los filósofos concierne a la flecha del tiempo, la asimetría entre pasado y futuro. Muchos asumen que la flecha se explica por la segunda ley de la termodinámica, que establece que la entropía, definida en términos amplios como la cantidad de desorden de un sistema, aumenta con el tiempo. Pero por ahora nadie ha podido dar razón de la segunda ley.

La explicación más admitida, propuesta por el físico austríaco Ludwig Boltzmann en el siglo XIX, es probabilística. De acuerdo con su idea básica, las formas de presentarse desordenado un sistema superan las de su estado ordenado. Si un sistema dado se encuentra ahora bastante ordenado, casi seguro que estará más desordenado dentro de un rato. Este razonamiento, sin embargo, es simétrico en el tiempo. También es probable que estuviese más desordenado hace un rato. Como reconoció Boltzmann, la única manera de asegurar el crecimiento de la entropía en el futuro es comenzar con un valor bajo de la entropía en el pasado. Así, la segunda ley no constituye tanto una verdad fundamental cuanto un suceso histórico, quizá relacionado con lo ocurrido en la gran explosión.

Otras teorías de la flecha del tiempo son igualmente incompletas. El filósofo Huw Price, de la Universidad de Sydney, sostiene que casi todos los intentos de explicar la asimetría del tiempo adolecen de razonamientos circulares; que encierran, digamos, presunciones ocultas de la asimetría temporal. Su trabajo es un ejemplo de cómo los filósofos pueden intervenir —en palabras del filósofo Richard Healey, de la Universidad de Arizona— a modo de "conciencia intelectual del físico en ejercicio". Entrenados especialmente en el rigor lógico, son expertos en detectar sesgos sutiles.

La vida sería aburrida si escucháramos siempre a nuestra conciencia. Los físicos han dado a veces lo mejor de sí cuando ignoran a los filósofos. Pero en la eterna batalla contra nuestros deslices lógicos, a veces no disponemos más que de la conciencia.

La máquina del tiempo

Difícil sería construir una, pero quizá no imposible

Paul Davies

El viaje en el tiempo ha sido un tema recurrente de la ciencia ficción desde que H. G. Wells escribiera su célebre novela *La máquina del tiempo* allá por 1895. Pero, ¿es posible construir una máquina que transporte un ser humano al pasado o al futuro?

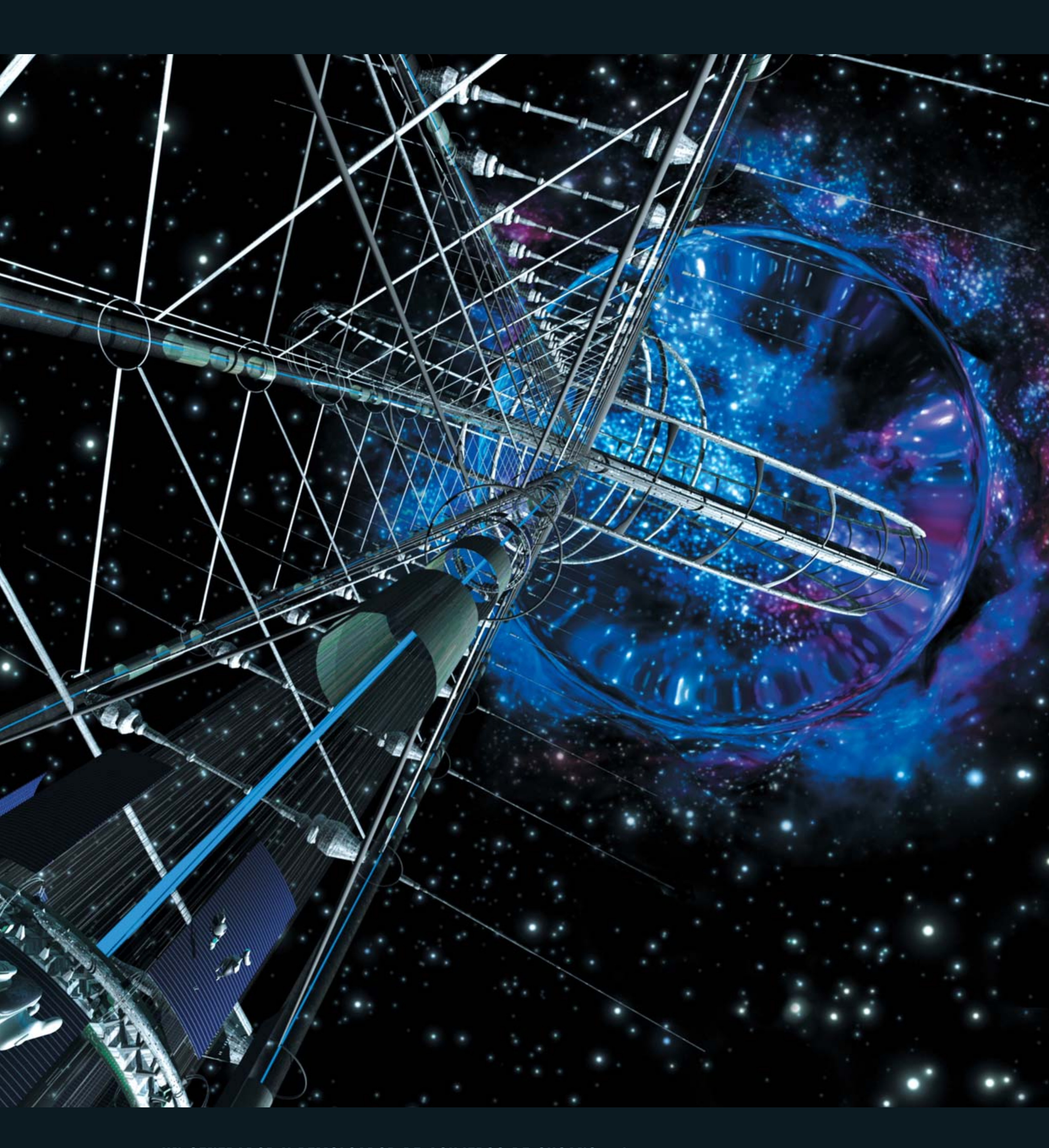
Durante decenios, el viaje en el tiempo estuvo proscrito por la ciencia respetable. En los últimos años, sin embargo, parece como si los físicos teóricos se recrearan en ello. ¿No es acaso divertido cavilar sobre viajes en el tiempo? Pero la investigación tiene también una vertiente seria. Es capital comprender la relación entre causa y efecto si se quiere elaborar una teoría unificada de la física. Caso de ser posible el viaje en el tiempo sin restricciones, aunque sólo fuera en principio, la naturaleza de tal teoría unificada se vería radicalmente afectada.

Nuestro más penetrante conocimiento del tiempo proviene de las teorías de la relatividad de Einstein. Antes de su formulación, se creía que el tiempo era absoluto y universal, idéntico para todos, sin importar cuáles fuesen las circunstancias físicas. En su teoría de la relatividad especial, Einstein enunció que el intervalo medido por los relojes de un sistema de referencia entre dos sucesos dependía de su movimiento. Los relojes de dos sistemas de referencia que se muevan de manera diferente registrarán lapsos de tiempo distintos entre dos sucesos que ocurran en el mismo momento.

Es habitual describir ese efecto mediante "la paradoja de los gemelos". Supongamos que Lola y Luis son gemelos. Lola se monta en una nave espacial y viaja a elevada velocidad hasta una estrella cercana, da media vuelta y regresa a la Tierra, donde le espera Luis. Para Lola la duración del periplo podría ser de un año, pongamos por caso, pero cuando desciende de la nave espacial se encuentra con que en la Tierra han transcurrido diez años. Su hermano es ahora nueve años mayor que ella. Lola y Luis ya no tienen la misma edad, a pesar de haber nacido el mismo día. Este ejemplo ilustra una clase limitada de viaje en el tiempo. En efecto, Lola ha avanzado nueve años hacia el futuro de la Tierra.



PETER BOLLINGER



UN GENERADOR Y REMOLCADOR DE AGUJEROS DE GUSANO, tal y como lo imagina el artista Peter Bollinger. La ilustración representa un enorme acelerador de partículas espacial que crea, agranda y traslada agujeros de gusano para utilizarlos como máquinas del tiempo.

Desfase horario

El efecto, conocido como dilatación del tiempo, tiene lugar siempre que dos sistemas de referencia se mueven uno respecto al otro. En la vida corriente no percibimos extrañas distorsiones del tiempo, porque el efecto sólo resulta palmario cuando el movimiento se realiza a velocidades cercanas a la de la luz. Incluso a la velocidad de un avión, la dilatación del tiempo en un viaje asciende sólo a unos pocos nanosegundos. Con todo, los relojes atómicos son tan precisos, que registran la deriva y confirman que realmente el tiempo se estira con el movimiento. De modo que el viaje hacia el futuro es un hecho probado, aun cuando sólo se haya experimentado en cuantía poco apasionante.

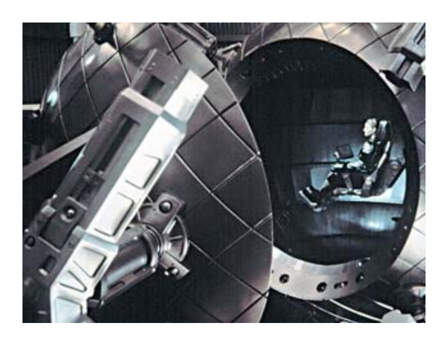
Para observar distorsiones del tiempo espectaculares hay que escudriñar más allá del ámbito de la experiencia ordinaria. Los grandes aceleradores impulsan las partículas subatómicas a una velocidad cercana a la de la luz. Algunas de estas partículas, como los muones, contienen un reloj intrínseco: se desintegran con una vida media determinada. En conformidad con la teoría de Einstein, se observa que los muones que se mueven rápidamente en los aceleradores se desintegran a cámara lenta. Algunos rayos cósmicos también experimentan portentosas distorsiones del tiempo. Estas partículas se mueven a una velocidad tan próxima a la de la luz que atraviesan la galaxia en minutos, a pesar de que en el sistema de referencia de la Tierra parezca que les lleva decenas de miles de años. Si no ocurriera la dilatación del tiempo, esas partículas nunca hubiesen llegado aquí.

La velocidad es una manera de avanzar en el tiempo. La gravedad es otra. En su teoría general de la relatividad, Einstein predijo que la gravedad retarda el tiempo. Los relojes avanzan un poco más rápido en el ático que en el sótano, que al estar más cerca del centro de la Tierra se halla inmerso más profundamente en el campo gravitatorio. De modo similar, los relojes avanzan más rápido en el espacio que en la Tierra. De nuevo el efecto es minúsculo, pero se ha medido directamente con relojes precisos. Para el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) hubo que tener en cuenta estos efectos de distorsión temporal. Si no, marinos, taxistas y misiles crucero se apartarían muchos kilómetros de su ruta.

En la superficie de una estrella de neutrones, la gravedad adquiere tal intensidad, que el tiempo se retrasa un 30 por ciento con respecto al de la Tierra. Vistos desde esa estrella, los sucesos de aquí parecerían una película a cámara rápida. Un agujero negro representa la máxima distorsión del tiempo; en la superficie del agujero, el tiempo se detiene respecto al de la Tierra. Eso significa que, si cayésemos en un agujero negro desde sus alrededores, en el breve intervalo que nos llevaría alcanzar la superficie habría transcurrido para el resto del universo una eternidad. El seno del agujero negro está por tanto más allá del final del tiempo, en lo que concierne al universo exterior. Si un astronauta pasase a toda velocidad muy cerca de un agujero negro y regresara indemne, daría un gran salto hacia el futuro.

Solución de Gödel

Hasta ahora hemos tratado del viaje en el tiempo hacia delante. ¿Y para volver hacia atrás? Eso es mucho más problemático. En 1948 Kurt Gödel, por entonces en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, obtuvo una solución de las ecuaciones del campo gravitatorio de Einstein que describían un universo en rotación; en él, un astronauta podría viajar a través del espacio hasta alcanzar su propio pasado. Se debería ello a la manera en la que la gravedad afecta a la luz en esa solución. La rota-



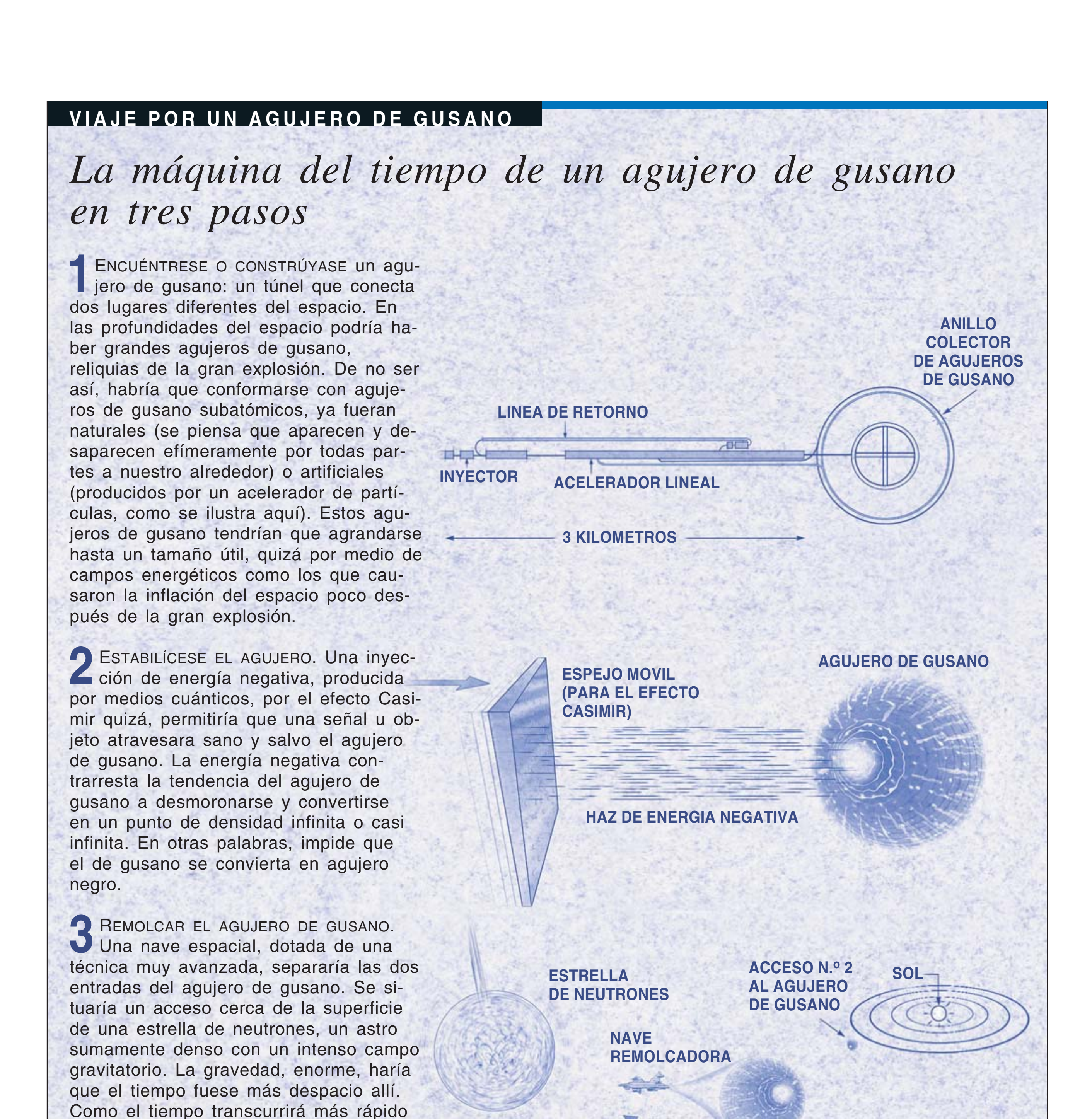
ción del universo arrastraría consigo la luz (y por tanto las relaciones causales entre los objetos), permitiendo que un objeto material viajara en una trayectoria cerrada en el espacio, que también se cerraría en el tiempo, sin que en ningún momento se sobrepasara la velocidad de la luz en la vecindad inmediata de la partícula. La solución de Gödel se dejó de lado como una curiosidad matemática; después de todo, las observaciones no muestran signo alguno de que el universo en su conjunto esté girando. Su resultado sirvió, eso sí, para demostrar que la teoría de la relatividad no proscribía el viaje hacia atrás en el tiempo. Efectivamente, Einstein confesó que le turbaba la idea de que su teoría permitiera viajar al pasado bajo algunas circunstancias.

Se han encontrado otros estados de cosas en los que cabría viajar al pasado. En 1974 Frank J. Tipler, de la Universidad de Tulane, calculó que un cilindro muy pesado, infinitamente largo, que girara en torno a su eje a una velocidad cercana a la de la luz, permitiría que los astronautas visitasen su propio pasado; la razón, de nuevo, estribaba en la luz, que sería arrastrada

COLECCION EVERETT

Resumen

- Viajar hacia el futuro en el tiempo es bastante fácil. Para quien hiciera un viaje de ida y vuelta a una velocidad cercana a la de la luz o pasando por un campo gravitatorio intenso, el tiempo habría transcurrido más lento que para quienes se hubiesen quedado en el punto de partida.
- Viajar hacia el pasado. La teoría de la relatividad lo permite en algunas configuraciones del espacio-tiempo: un universo en rotación, un cilindro giratorio o los famosos agujeros de gusano (túneles a través del espacio y del tiempo).



PHILIP HOWE

alrededor del cilindro a una trayectoria cerrada. En 1991, J. Richard Gott, de la Universidad de Princeton, predijo que las cuerdas cósmicas (unas estructuras que, según creen los cosmólogos, se crearon en las etapas primitivas de la gran explosión) podrían causar resultados similares. Pero a mediados de los años ochenta se había formulado ya la situación más realista para una máquina del tiempo; fundábase en el concepto de agujero de gusano.

Los agujeros de gusano ofrecerían un atajo entre dos puntos muy separados del espacio. Al saltar a uno, apareceríamos, momentos después, en el otro lado de la galaxia. Encajan de manera natural en la teoría general de la relatividad, donde la gravedad no sólo distorsiona el tiempo, sino también el espacio. La teoría permite que haya conexiones, similares a un túnel, entre dos puntos del espacio. A un espacio así los matemáticos lo llaman múltiplemente conexo. Al igual que un túnel que pase por debajo de un monte resultará más corto que la

CAMBIAR EL PASADO

La madre de todas las paradojas

LA CÉLEBRE PARADOJA DE LA MADRE (a veces formulada empleando otra relación de parentesco) se plantea cuando las personas o los objetos pueden viajar hacia atrás en el tiempo. Hay una versión simplificada: una bola de billar pasa por una máquina del tiempo de agujero de gusano. Al salir, choca consigo misma e impide su propia entrada en el agujero de gusano.

LA PARADOJA SE RESUELVE teniendo en cuenta algo bien simple: la bola de billar no puede hacer nada que sea incompatible con la lógica o las leyes de la física. No puede pasar por el agujero de gusano de suerte tal, que impida que pase por el agujero de gusano. Pero nada obsta para que lo atraviese de muchas otras maneras.

3 LA BOLA SALE DEL AGUJERO DE GUSANO EN UN INSTANTE ANTERIOR

2 LA BOLA ENTRA EN EL AGUJERO DE GUSANO

4 LA BOLA CHOCA CONTRA SI MISMA

5 LA BOLA NO ENTRA EN EL AGUJERO DE GUSANO

1 BOLA DE BILLAR LANZADA HACIA EL AGUJERO DE GUSANO



carretera que rodee la ladera, un agujero de gusano sería un camino más breve que la ruta usual por el espacio ordinario.

Carl Sagan recurrió a los agujeros de gusano como dispositivos ficticios en la novela *Contacto*, de 1985. Kip S. Thorne y sus colaboradores del Instituto Tecnológico de California, azuzados por Sagan, se propusieron averiguar si eran compatibles con la física conocida. Partieron de que un agujero de gusano se parecería a un agujero negro en que su gravedad sería enorme. Pero al revés que un agujero negro, que ofrece un camino de sentido único hacia ningún lado, un agujero de gusano tendría salida y no sólo entrada.

FORMAS ACTUALES DE VIAJAR EN EL TIEMPO

SISTEMA	ESPECIFICACIONES	DESFASE TEMPORAL ACUMULADO
Vuelo en avión	920 kilómetros por hora durante ocho horas	10 nanosegundos (respecto al sistema de referencia inercial)
Permanencia en un submarino nuclear	A 300 metros de profundidad durante 6 meses	500 nanosegundos (respecto al nivel del mar)
Neutrón de un rayo cósmico	10^{18} electronvolt	Vida media de 15 minutos alargada hasta los 30.000 años
Estrella de neutrones	Corrimiento al rojo de 0,2	Los intervalos de tiempo se expanden un 20 por ciento (con respecto al espacio profundo)

Materia exótica

Para que el agujero de gusano se pudiera atravesar, debería contener lo que Thorne calificó de materia exótica, generadora de antigravedad, para combatir la tendencia natural de los cuerpos con mucha masa a convertirse en agujeros negros por su propio peso. Se sabe que en algunos sistemas cuánticos existen estados con energía negativa; las leyes de la física, pues, no vedan la materia exótica de Thorne, aunque no está claro que se pueda juntar tanta sustancia antigravitatoria como para estabilizar un agujero de gusano [*véase* "¿Qué es la energía negativa?", por Lawrence H. Ford y Thomas A. Roman; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2000].

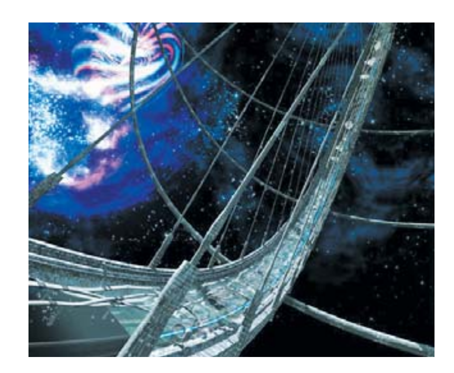
PHILIP HOWE

Thorne y sus colaboradores comprendieron que, si se pudiese crear un agujero de gusano estable, se podría también convertirlo en una máquina del tiempo. Un astronauta que lo cruzara no sólo saldría en cualquier lugar del universo, sino en cualquier época: bien en el futuro, bien en el pasado.

Para adaptar el agujero de gusano al viaje en el tiempo, habría que arrastrar uno de sus accesos hasta las cercanías de una estrella de neutrones; habría que dejarlo cerca de la superficie de ésta. La gravedad de la estrella ralentizaría el tiempo cerca de esa entrada, de manera que se iría acumulando una diferencia de tiempo entre los extremos del agujero de gusano. Si ambos accesos se emplazaran luego en un lugar idóneo del espacio, esa diferencia de tiempo quedaría congelada.

Supongamos que la diferencia fuera de 10 años. Un astronauta que atravesara el agujero de gusano en una dirección saltaría 10 años hacia el futuro, mientras que otro que lo atravesara en sentido contrario saltaría 10 años hacia el pasado. Regresando a su punto de partida a elevada velocidad por el espacio ordinario, el segundo astronauta volvería a casa antes de haber salido. En otras palabras, una trayectoria cerrada en el espacio se podría convertir, asimismo, en una trayectoria cerrada en el tiempo. La única restricción consiste en que el astronauta no podría regresar a un tiempo anterior al de la construcción del agujero de gusano.

Un problema colosal que se interpone en la fabricación de una máquina del tiempo a partir de un agujero de gusano es la creación del agujero de gusano en sí. Pudiera acontecer que en el espacio se den estructuras de ese tipo de manera natural, como reliquias de la gran explosión. En tal caso, una supercivilización podría hacerse con el control de una de ellas. O bien podrían aparecer agujeros de gusano a escalas minúsculas, a la llamada longitud de Planck, unos 20 órdenes de magnitud menor que el núcleo atómico. En principio, cabría estabilizar un agujero de gusano tan diminuto mediante un impulso de energía, para luego agrandarlo hasta una dimensión que permitiera su uso.



PETER BOLLINGER

Paradojas

Suponiendo que se resolvieran los problemas de ingeniería, la producción de una máquina del tiempo abriría una caja de Pandora de paradojas causales. Piénsese, por ejemplo, en un viajero por el tiempo que visitara el pasado y asesinase a su madre cuando aún era niña. ¿Cómo se puede racionalizar esto? Si la niña muere, no puede llegar a ser la madre del viajero en el tiempo. Pero si el viajero en el tiempo nunca nació, no podría regresar para matar a su madre.

Las paradojas de este tipo surgen cuando el viajero en el tiempo intenta cambiar el pasado, lo cual está claro que es imposible. Pero eso no impide que alguien forme parte del pasado. Supongamos que el viajero en el tiempo regresa y salva a una niña de ser asesinada, y esa niña es su madre. El lazo causal es entonces coherente; no constituye ninguna paradoja. La congruencia causal impone restricciones a lo que un viajero en el tiempo pueda hacer, pero no excluye la posibilidad del propio viaje.

Aun cuando el viaje en el tiempo no fuera, en sentido estricto, paradójico, no dejaría de resultar muy extraño. Un viajero del tiempo se adelanta un año y lee algo sobre un nuevo teorema matemático en un futuro número de *Investigación y Ciencia*. Apunta los detalles, regresa a su propio tiempo y le enseña el teorema a un estudiante, que lo escribe para *Investigación y Ciencia*. Artículo, claro está, que es el que ha leído el viajero del tiempo. La cuestión que se plantea es: ¿de dónde provino la información sobre el teorema? No del viajero del tiempo, que la leyó, ni del estudiante, que la obtuvo del viajero del tiempo. La información al parecer no proviene de ninguna parte, de ningún raciocinio.

Las extrañas consecuencias que derivan del viaje en el tiempo han llevado a algunos a rechazar la idea misma. Stephen W. Hawking, de la Universidad de Cambridge, propuso una “conjetura de protección de la cronología”, que impediría los lazos causales. Puesto que la teoría de la relatividad permite tales bucles causales, la protección de la cronología requeriría que interviniese algún otro factor que impidiera el viaje al pasado. ¿Cuál? De entrada, los procesos cuánticos. Con la existencia de una máquina del tiempo las partículas regresarían a su propio pasado. Los cálculos indican que la perturbación producida se reforzaría a sí misma; se crearía una fuente incontrolada de energía que acabaría por desbaratar el agujero de gusano.

La protección de la cronología es, por ahora, tan sólo una conjetura; por tanto, el viaje en el tiempo sigue siendo posible. La resolución definitiva de esta cuestión quizá tenga que esperar a que se logre la unificación de la mecánica cuántica y la gravitación, gracias a la teoría de cuerdas o a su extensión, la llamada teoría M. Cabe incluso especular que, con la próxima generación de aceleradores de partículas, se puedan crear agujeros de gusano subatómicos que sobrevivan lo suficiente como para que las partículas cercanas trencen lazos causales efímeros. No tendría mucho que ver con la máquina del tiempo que imaginaba Wells, pero cambiaría para siempre nuestra concepción de la realidad física.

Bibliografía complementaria

FÍSICA CUÁNTICA DE LOS VIAJES A TRAVÉS DEL TIEMPO. David Deutsch y Michael Lockwood, en *Investigación y Ciencia*, págs. 48-54; mayo 1994.

BLACK HOLES AND TIME WARPS: EINSTEIN'S OUTRAGEOUS LEGACY. Kip S. Thorne. W. W. Norton, 1994.

TIME TRAVEL IN EINSTEIN'S UNIVERSE: THE PHYSICAL POSSIBILITIES OF TRAVEL THROUGH TIME. J. Richard Gott III. Houghton Mifflin, 2001.

HOW TO BUILD A TIME MACHINE. Paul Davies. Viking, 2002.



TOM DRAPER DESIGN; MICHAEL DAVIDSON (*microprocesador*), BSIP (*ojo*), G. C. KELLEY (*colibrí*) Y SCOTT CAMAZINE (*radiografía de tórax*). *Photo Researchers, Inc.*

De lo instantáneo

Las unidades de tiempo cubren desde los episodios más efímeros hasta duraciones interminables. Las descripciones que aquí ofrecemos tratan de dar idea de este vasto abanico cronológico

UN ATTOSEGUNDO (10^{-18} segundos, una trillonésima de segundo)
Los fenómenos más fugaces que la ciencia puede cronometrar se miden en attosegundos. Con láseres de alta velocidad muy perfeccionados se han emitido destellos luminosos que duran tan sólo 250 attosegundos. Aunque tal duración parezca inimaginablemente corta, es toda una eternidad si la comparamos con el tiempo de Planck (alrededor de 10^{-43} segundos) que constituye, se supone, la más breve duración posible.

UN FEMTOSEGUNDO (10^{-15} segundos, una milésima de billonésima de segundo)
En las moléculas, los átomos realizan una oscilación individual completa en tiempos de 10 a 100 femtosegundos. Las reacciones químicas más rápidas requieren, por lo general, centenares de femtosegundos. La interacción entre la luz y los pigmentos de la retina —el proceso que permitirá la visión— invierte alrededor de 200 femtosegundos.

UN PICOSEGUNDO (10^{-12} segundos, una billonésima de segundo)
Los transistores más rápidos operan en picosegundos. El quark “fondo”, rara partícula subatómica creada en aceleradores de altas energías, tarda un picosegundo en desintegrarse. A temperatura ambiente, la vida media de un enlace de hidrógeno entre moléculas de agua es de tres picosegundos.

UN NANOSEGUNDO (10^{-9}, una millardésima de segundo)
Un rayo de luz que viajase por el vacío avanzaría sólo 30 centímetros en este tiempo. El microprocesador de un ordenador personal tarda normalmente entre dos y cuatro nanosegundos en ejecutar una instrucción individual, como la adición de dos números. El mesón K, otra partícula subatómica rara, tiene una vida de 12 nanosegundos.

UN MICROSEGUNDO (10^{-6}, una millonésima de segundo)
En este tiempo, el rayo de luz habría recorrido 300 metros, la longitud de tres campos de fútbol, mientras que, al nivel del mar, un sonido se habría propagado solamente un tercio de milímetro. El destello de un estroboscopio comercial de alta velocidad dura alrededor de un microsegundo. Un cartucho de dinamita tarda 24 microsegundos en hacer explosión, una vez consumida su mecha.

UN MILISEGUNDO (10^{-3}, una milésima de segundo)
El tiempo de exposición más breve de una cámara fotográfica típica. Una mosca bate una vez las alas cada tres milisegundos, y una abeja, cada cinco. Cada año, la Luna viaja en torno a la Tierra dos milisegundos más lentamente, por la ampliación de su órbita.

UNA DECIMA DE SEGUNDO
La duración del mítico “abrir y cerrar de ojos”. Es el tiempo que necesita el oído humano para discriminar entre el sonido original y su eco. El Voyager 1, nave que está abandonando el sistema solar, se aleja en el ínterin un par de kilómetros del Sol. Un colibrí puede batir sus alas siete veces.

UN SEGUNDO
El latido del corazón de una persona sana dura alrededor de este tiempo. La Tierra, entretanto, recorre 30 kilómetros alrededor del Sol, mientras que el Sol avanza 270 en su peregrinaje por la galaxia. No es tiempo suficiente para que la luz lunar llegue a la Tierra (1,3 segundos). La definición tradicional del segundo era la 86.400-ava parte de la duración del día solar medio, pero en la actualidad se utiliza una definición más precisa: es la duración de 9.192.631.770 ciclos de cierto tipo de radiación producida por un átomo de cesio 133.

a lo eterno

UN MINUTO

En este tiempo, el cerebro de un neonato crece entre uno y dos miligramos. El corazón de una musaraña ha latido unas 1000 veces. Una persona normal puede pronunciar unas 150 palabras, o leer unas 250. La luz del Sol tarda algo más de 8 minutos en llegar a la Tierra; cuando Marte se encuentra a distancia mínima de nosotros, la luz reflejada por el planeta rojo tarda unos 4 minutos en alcanzarnos.

UNA HORA

Las células tardan aproximadamente una hora en dividirse en dos. Una hora y 16 minutos es el tiempo medio entre dos erupciones del géiser Old Faithful, en el parque Yellowstone. La luz de Plutón, el planeta más distante de nuestro sistema solar, llega a la Tierra en 5 horas y 20 minutos.

UN DIA

Seguramente sea, para los humanos, la unidad de tiempo más natural, la duración de una rotación de la Tierra referida al Sol. En la actualidad, el día sideral, ligeramente más breve que el día solar, está cronometrado en 23 horas, 56 minutos y 4,1 segundos. La rotación de nuestro planeta se ralentiza incesantemente a causa del freno gravitatorio de la Luna y de otras influencias. El corazón humano late unas 100.000 veces al día; en ese tiempo, los pulmones inhalan y expelen unos 14.000 litros de aire. Una cría de ballena azul ganará otros 90 kilos de peso en dicho lapso.

UN AÑO

La Tierra recorre su órbita alrededor del Sol; ha realizado 365,26 rotaciones sobre su eje. El nivel medio de los mares se eleva entre 1 y 2,5 milímetros, y la placa tectónica norteamericana se desplaza hacia el oeste unos 4 centímetros. Hacen falta 4,3 años para que la luz de Proxima Centauri, la estrella más cercana, llegue a la Tierra: aproximadamente lo mismo que tardan las corrientes oceánicas superficiales en circunnavegar el globo.

UN SIGLO

La Luna se aleja de la Tierra otros 3,8 metros. Se supone que es lo que tardarán los discos compactos y los CD-ROM en degradarse. Los nacidos entre 1950 y 1960 tienen menos de una posibilidad entre 26 de llegar a centenarios; en cambio, la esperanza de vida de una tortuga gigante es de 177 años. Los CD grabables más perfectos pueden durar más de 200 años.

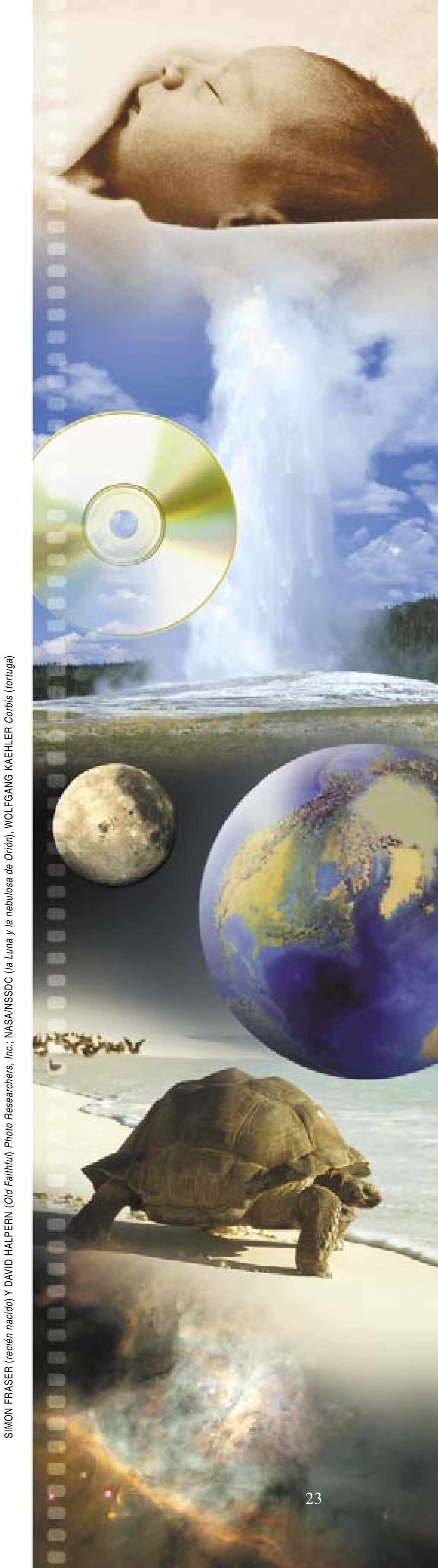
UN MILLON DE AÑOS

Una nave espacial que se desplazase a la velocidad de la luz no habría llegado todavía a medio camino de la galaxia de Andrómeda, que dista 2,3 millones de años-luz. Las estrellas de mayor masa, las supergigantes azules, que son millones de veces más brillantes que nuestro Sol, se consumirán en este tiempo. A causa del movimiento de las placas tectónicas, dentro de un millón de años, San Francisco habrá reptado 40 kilómetros al noroeste de su ubicación actual.

MIL MILLONES DE AÑOS

Hizo falta este tiempo, aproximadamente, para que la Tierra recién formada se enfriase, aparecieran mares y océanos, naciera en ella la vida unicelular y su atmósfera rica en dióxido de carbono fuese trocada por otra rica en oxígeno. El Sol, entretanto, había descrito cuatro órbitas en torno al centro de la galaxia. Dado que el universo cuenta entre 12.000 y 14.000 millones de años, los múltiplos del millardo de años no son de uso frecuente. Pero los cosmólogos opinan que el universo seguirá expandiéndose indefinidamente, hasta mucho después de la muerte de la última estrella (dentro de unos 100 billones de años) y de la evaporación del último agujero negro (dentro de unos 10^{100} años). Nuestro futuro se prolonga mucho más allá que los rastros de nuestro pasado.

Lista confeccionada por David Labrador



SIMON FRASER (*recién nacido*) Y DAVID HALPERN (*Old Faithful*) *Photo Researchers, Inc.*; NASA/NSSDC (*la Luna y la nebulosa de Orión*), WOLFGANG KAEHLER *Corbis* (*tortuga*)

Texto y fotos: Sergio Rossi

Plancton gelatinoso

Ignorado durante mucho tiempo por la ecología marina, el plancton gelatinoso está adquiriendo ahora un interés creciente en los estudios oceanográficos. ¿Por qué? Por dos motivos principales importa comprender mejor la biología y ecología de sifonóforos, medusas o salpas. Por un lado, diversas especies han invadido zonas donde no abundaban antaño, si es que allí vivían. Entre las circunstancias que explican el fenómeno se cita el aumento de la eutrofización. Se supone que el incremento de la misma registrado durante los últimos años en el Mar Menor pudo ser el acicate necesario para la reproducción masiva de un escifozoo, la medusa *Cotylorhiza tuberculata*, cuya fase de pólipo encontró probablemente sustrato duro en los cultivos de ostras.

Intervienen también otras causas. En la bahía de San Francisco una pequeña hidromedusa (*Maeotias* sp), introducida probablemente por cargueros u otros buques ha invadido la bahía y desplazado a varias especies autóctonas al haber encontrado un hábitat ideal para su desarrollo. En el Mar Negro, una especie de ctenóforo alóctono (*Mnemiopsis leidyi*) depreda activamente sobre larvas de anchoa, siendo posiblemente uno de los factores que ha esquilmado los caladeros turcos y búlgaros de esa región. En efecto, muchas especies (y no sólo de plancton gelatinoso), al penetrar en un ecosistema extraño, si logran proliferar con éxito, suplantan, si no eliminan, especies propias del lugar.

Pero el plancton gelatinoso ha despertado la atención de los investigadores por otra razón poderosa, a saber, su reciente papel preponderante en las cadenas tróficas marinas. Empieza a considerarse la hipótesis de que la sobrepesca ha producido un cambio en los depredadores principales de crustáceos copépodos, siendo las medusas carnívoras las más beneficiadas. Antes, los sistemas productivos solían asociarse con copépodos de gran tamaño y abundante pesca, mientras que los sistemas menos productivos se asociaban con copépodos de menor tamaño y plancton gelatinoso (ctenóforos y medusas). Pero la realidad que hoy se nos presenta en muchos lugares es la abundancia de plancton gelatinoso en ambos tipos de sistema.



1. Playas de la isla escocesa de Cumbrae, con cientos de medusas varadas tras una tormenta (arriba). *Ejemplar de* Pelagia noctiluca *agonizante en el fondo marino; ha llegado a la costa empujada por las corrientes principales de mar a tierra* (abajo)



2. Ctenóforo Leucothea multicornis*, con bandas longitudinales bioluminiscentes*



3. En la umbela de esta medusa (Rhizostoma pulmo) *se refugian juveniles de peces inmunes a la picada de los cnidoblastos del escifozoo*



4. Las medusas son animales con escaso movimiento propio que aprovechan las corrientes marinas principales para desplazarse por la masa de agua



El tiempo biológico

Con su cómputo en minutos, meses o años, los relojes biológicos mantienen en punto el funcionamiento del cerebro y del organismo entero

Karen Wright

El psicobiólogo John Gibbon solía llamar al tiempo "el contexto primordial": un hecho incrustado en la vida y experimentado por todos los organismos de cualquier época. Para la flor que extiende sus pétalos al amanecer, para los gansos que vuelan al sur en otoño, para las langostas que se asocian en enjambres cada 17 años, e incluso para los mohos del suelo que esporulan en ciclos diarios, la sincronización lo es todo. En el organismo humano los relojes biológicos marcan los segundos, los minutos, los días, los meses y los años. Gobiernan los movimientos de fracción de segundo de un servicio en el tenis y explican los desarreglos producidos por el cambio de los husos horarios en los viajes, la aparición mensual de las hormonas menstruales y los accesos de melancolía que nos llegan con el invierno. Los cronómetros celulares pueden decidir incluso cuándo se apaga nuestro tiempo y morimos.

Los marcapasos implicados divergen entre sí no menos que un reloj solar y un cronómetro. Los hay exactos e inflexibles. Otros, aunque no tan fiables, se hallan sujetos a un control consciente. Algunos se activan por ciclos planetarios, otros por ciclos moleculares. Son esenciales para la mayoría de las complejas tareas que realizan el cerebro y el organismo. Los mecanismos de determinación de los ritmos nos ayudan a entender el envejecimiento y la enfermedad. El cáncer, la enfermedad de Parkinson, la depresión estacional y el problema de la deficiencia de atención se han vinculado a fallos en el funcionamiento de los relojes biológicos.

Aunque queda mucho por conocer sobre la fisiología de estos marcadores del tiempo, la neurología y otras disciplinas nos ofrecen ya respuestas a las cuestiones más acuciantes planteadas por la experiencia humana en la cuarta dimensión. ¿Por qué la expectativa de un acontecimiento demora el paso del tiempo? ¿Por qué vuela éste cuando nos divertimos? ¿Por qué puede provocarnos indigestión pasar la noche entera trabajando o estudiando? ¿Por qué vivimos más que los hámsters? Es sólo cuestión de tiempo el que los estudios sobre estos relojes despejen incógnitas más profundas de nuestra existencia.

El cronómetro psicoactivo

Si este artículo despierta la curiosidad del lector, el tiempo que le dedicará transcurrirá veloz. Se le hará eterno, si le aburre. Tiene la culpa un "cronómetro" de nuestro cerebro — reloj de intervalos— que identifica lapsos que van de segundos a horas. El reloj de intervalos ayuda a calcular la velocidad con que debemos correr para llegar al balón en el campo de juego. Nos dice cuándo hemos de aplaudir nuestra canción favorita. Nos hace sentir cuánto tiempo podemos seguir en la cama después de que haya sonado el despertador.

Estos cronómetros de intervalo afectan a las facultades cognitivas superiores de la corteza cerebral, centro que controla la percepción, la memoria y el pensamiento consciente. Cuando nos acercamos a un semáforo, por ejemplo, podemos calcular el tiempo que ha estado en ámbar y compararlo con un recuerdo que nos dice cuánto tiempo dura habitualmente encendido el foco ámbar. Decidimos entonces si frenamos o apretamos el acelerador.

Stephen M. Rao, de la Universidad de Wisconsin, ha estudiado, apoyado en la técnica de formación de imágenes por resonancia magnética funcional (RMf),

TOM DRAPER DESIGN; NASA/NSSDC (*La Tierra y la Luna*); CORBIS (*pitcher y trompetista*); TOMMY FLYNN *Photonica* (*despertador*); CORBIS (*desayuno*); JOHN TERRENCE TURNER *Getty Images* (*carretera*); ROBERT DALY *Stone* (*mesa de comedor*); ERICA MCCONNELL *Getty Images* (*cepillado de dientes*); GEOFF MANASSE *Aurora* (*niño leyendo*); YOSHINORI WATABE *Photonica* (*cielo nocturno*)

qué partes del cerebro se hallan implicadas en cada una de estas etapas. En la máquina de RMf, los sujetos escuchan dos pares de notas musicales y exponen si el intervalo entre el segundo par es más corto o más largo que el que media entre el primero. Las estructuras cerebrales involucradas en la tarea consumen más oxígeno; el barrido de RMf registra cambios en el flujo de sangre y la oxigenación una vez cada 250 milisegundos. Cuando hacemos esto, las primeras estructuras en activarse son los ganglios basales.

Asociado desde hace mucho con el movimiento, este conjunto de regiones cerebrales se ha convertido en el principal sospechoso de las investigaciones sobre mecanismos posibles de los cronómetros de intervalo. Un área de los ganglios basales, el cuerpo estriado, alberga una población de células nerviosas muy bien conectadas que reciben señales de otras partes del cerebro. Las ramas largas de estas células del estriado aparecen cubiertas por espinas, en número de 10.000 a 30.000; cada una recoge información de una neurona diferente situada en otra región. Si el cerebro actúa como una red, entonces las neuronas espinosas del estriado devienen nódulos críticos. Se trata de uno de los escasos lugares del cerebro donde millares de neuronas convergen en una sola.

Modelo de Meck

Las neuronas espinosas del estriado ocupan el centro de una teoría sobre la determinación temporal de intervalos que Warren H. Meck, hoy en la Universidad de Duke, desarrolló con Gibbon a lo largo del último decenio. Esta teoría propone un conjunto de osciladores nerviosos en la corteza cerebral: células nerviosas activadas en momentos diferentes, sin relación con los tempos de las células vecinas. En efecto, se sabe que muchas células corticales se excitan a unas velocidades que varían de 10 a 40 ciclos por segundo, sin estímulo externo. Se trata de neuronas que oscilan según su propio ritmo.

Los osciladores corticales se conectan con el estriado a través de millones de ramas portadoras de señales. La información la reciben las células espinosas. Entonces algo —digamos la luz ámbar de un semáforo— llama la atención de las células de la corteza. La estimulación mueve a todas las neuronas de la corteza a entrar en actividad, causando una espiga característica en la descarga eléctrica unos 300 milisegundos después. Esta espiga de atención actúa a modo de pistoletazo de salida, después del cual las células corticales reanudan sus oscilaciones erráticas.

Pero, como han comenzado simultáneamente, los ciclos generan ahora un patrón claro de activación nerviosa, de momento a momento, que puede reproducirse. Las neuronas espinosas controlan estos patrones de activación, que ayudan a "medir" el tiempo transcurrido. Al final de un intervalo específico —cuando, por ejemplo, el semáforo se pone rojo—, la sustancia negra, una parte de los ganglios basales, envía una descarga del neurotransmisor dopamina al cuerpo estriado. La descarga de dopamina insta a las neuronas espinosas a registrar el patrón de las oscilaciones corticales que reciben en ese instante, como un flash luminoso que expone la firma cortical del intervalo sobre la película de las neuronas espinosas. Para cada intervalo, hay un identificador temporal propio.

Una vez que la neurona espinosa identificó el identificador temporal del intervalo relativo a un suceso determinado, siempre que vuelva a ocurrir el mismo evento se producirá el "pistoletazo" cortical, con la liberación simultánea de una descarga de dopamina al comienzo del intervalo. La descarga de dopamina indica ahora a las neuronas espinosas que presten atención a los patrones de los impulsos corticales que siguen. Cuando las neuronas espinosas reconocen la marca temporal que revela el final del intervalo, envían un pulso eléctrico del estriado al tálamo, otro centro del cerebro. El tálamo, a su vez, se pone en contacto con la corteza; las funciones cognitivas superiores —como la memoria y la toma de decisiones— asumen el mando. Por tanto, el mecanismo de señalización temporal de los intervalos recorre un circuito, que va de la corteza al estriado, pasa desde éste al tálamo, para retornar a la corteza.

Si el modelo de Meck es acertado y la descarga de dopamina desempeña un papel importante en la delimitación de un intervalo temporal, entonces las enfermedades y los medicamentos que afectan los niveles de dopamina deberán cortar también ese circuito o bucle de conexiones. Hasta ahora eso es precisamente lo que Meck y otros han encontrado. Los pacientes con enfermedad de Parkinson, por ejemplo, liberan menos dopamina en el estriado; sus "relojes" se retrasan. En algunos experimentos, estos pacientes infravaloran sistemáticamente la duración de los intervalos temporales.

La marihuana provoca un descenso de la dopamina disponible y frena el tiempo. La cocaína y la metanfetamina, drogas estimulantes, aumentan la disponibilidad de dopamina y aceleran el "reloj de intervalos"; el tiempo parece transcurrir más deprisa. La adrenalina y otras hormonas del estrés promueven también la aceleración del reloj; en ello podría esconderse la razón de que, en situaciones desagradables, los segundos se nos antojen horas. Los estados de concentración profunda o emoción extrema pueden inundar el sistema o ignorarlo por completo; en esos casos, diríase que el tiempo se detiene o que no existe en absoluto. Puesto que un bloqueo

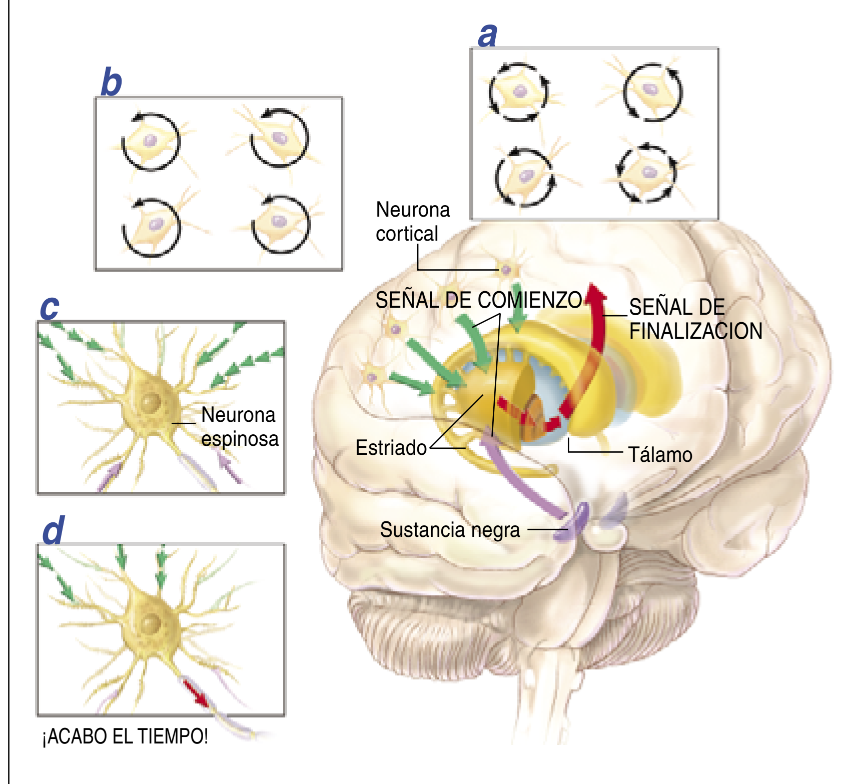
Resumen

- Hay en el cerebro un "cronómetro" que detecta intervalos de segundos, minutos y horas.
- Otro medidor de tiempo, más parecido a un reloj que a un cronómetro, sincroniza muchas funciones corporales con el día y la noche. Este mismo reloj podría dar cuenta del trastorno afectivo estacional.
- Un reloj de arena que gobierna el número de veces que puede dividirse una célula podría imponer una cota a nuestra longevidad.

MECANISMOS

Relojes cerebrales

CONOCEMOS LA EXISTENCIA de un reloj de intervalo (*arriba*), que mide intervalos que duran hasta horas, y un reloj circadiano (*abajo*), que conduce determinados procesos orgánicos a su punto máximo y a un punto mínimo en ciclos de 24 horas.

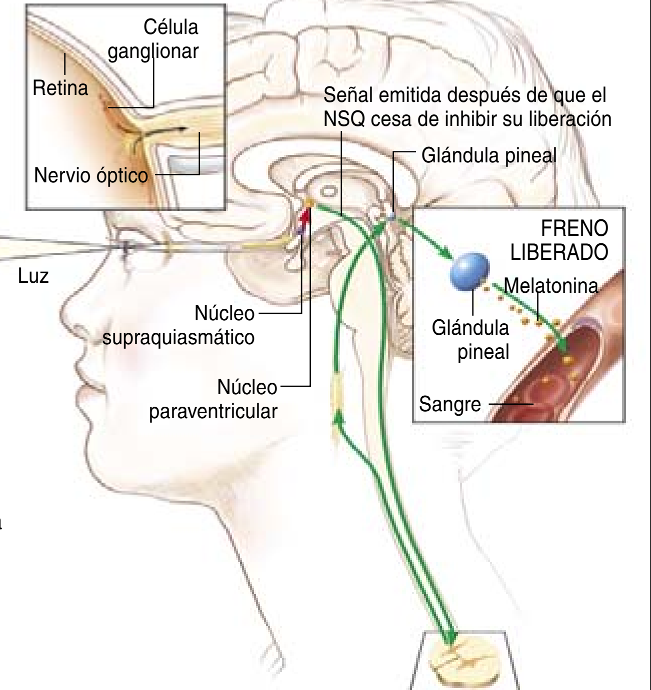


Reloj de intervalo

SEGÚN UN MODELO, el comienzo de un suceso que dura una cantidad de tiempo familiar (la luz ámbar del semáforo, que persiste unos cuatro segundos) activa el "botón de inicio" del reloj de intervalo evocando dos respuestas cerebrales. Excita un subgrupo determinado de células nerviosas corticales que entran en escena a velocidades diferentes (*a*) para que momentáneamente actúen juntas (*b* y *flechas verdes en el cerebro*); insta que las neuronas de la sustancia negra segreguen dopamina, un señalizador químico (*flecha púrpura*). Ambas señales despiertan las células espinosas del estriado (*c*), que supervisan los patrones de conjunto de los impulsos procedentes de las células corticales después de que estas neuronas reasuman su diferente velocidad de activación. Puesto que las células corticales actúan en sincronía al comienzo del intervalo, los patrones posteriores ocurren con la misma secuencia cada vez y adoptan una forma única y exclusiva cuando se alcanza el final del intervalo familiar (*d*). En ese momento, el cuerpo estriado envía una señal de "se acabó el tiempo" (*flechas rojas*), a través de otras zonas del cerebro, a la corteza, responsable de la toma de decisiones.

El reloj circadiano

LOS CICLOS DIARIOS de luz y oscuridad influyen cuando la actividad de muchos procesos fisiológicos que operan en ciclos de 24 horas se hallará en su punto máximo y mínimo. Para identificar las fluctuaciones de la luz, el cerebro se apoya en las células ganglionares de la retina del ojo. Cuentan algunas de las células con un pigmento, la melanopsina; a él corresponde probablemente detectar la luz, promoviendo que las células ganglionares envíen información sobre intensidad y duración a los núcleos supraquiasmáticos (NSQ) del cerebro. Luego, los NSQ transmiten la información a las regiones del cerebro y del cuerpo que controlan los procesos circadianos. Se conocen los sucesos que llevan a la glándula pineal a segregar melatonina, la hormona del sueño (*diagrama*). En respuesta a la luz del día, los NSQ emiten señales (*flecha roja*) que impiden que otra región del cerebro —el núcleo paraventricular— produzca una señal que, en último término, provocaría la liberación de melatonina. En la oscuridad, sin embargo, los NSQ liberan el freno, permitiendo que el núcleo paraventricular retransmita, a través de neuronas de la parte superior de la médula espinal y cuello, una señal que insta la segregación pineal de melatonina (*flechas verdes*).



TERESE WINSLOW

en la atención inicia el proceso indicador del tiempo, se supone que las personas hiperactivas, con déficit de atención, podrían tener problemas para establecer la duración real de los intervalos.

El cronómetro de intervalos, sometido a entrenamiento, puede operar con una mayor precisión. Los músicos y los atletas saben que con la práctica mejoran su identificación de los intervalos. Una persona corriente puede valerse de algunas estratagemas de cómputo cronométrico (de uno a mil) para compensar las limitaciones de su mecanismo. Rao prohíbe que los individuos de sus ensayos cuenten durante los mismos, porque podrían activarse los centros cerebrales relacionados con el lenguaje y con el pautado del tiempo. Pero el contar funciona, al menos para identificar a los impostores. El efecto resulta tan ostensible, que puede saberse si están contando o controlando el tiempo con sólo fijarse en la exactitud de sus respuestas.

Un reloj solar para nuestro cuerpo

Una de las virtudes de nuestro cronómetro que pauta los intervalos estriba en su flexibilidad. Podemos activarlo o detenerlo a voluntad e incluso ignorarlo por completo. Puede funcionar subliminalmente o hallarse sometido al control de la conciencia. Se descubrió que la precisión de los cronómetros de intervalo se sitúa entre un 5 y un 60 por ciento. No funcionan demasiado bien si estamos tensos o distraídos. Y los errores en el marcaje del tiempo se agravan con el alargamiento de los intervalos.

Por fortuna, disponemos de otro reloj más riguroso, que opera a intervalos de 24 horas. El reloj circadiano (del latín *circa*, alrededor de, y *dies*, un día) sintoniza nuestro organismo con los ciclos de luz solar y de oscuridad, originados por la rotación de la Tierra. Nos ayuda a programar el hábito diario de dormir por la noche y despertarnos por la mañana. Pero su influjo va más allá. La temperatura corporal alcanza su punto culminante al caer la tarde y su mínimo antes del amanecer. La presión arterial comienza a elevarse entre las 6 y las 7 de la mañana. La secreción del cortisol, hormona asociada al estrés, es de 10 a 20 veces más intensa por la mañana que por la noche. La micción y los movimientos intestinales, suprimidos durante la noche, se reinstauran por la mañana.

El ciclo circadiano opera sin necesidad de estímulos externos. Los estudios realizados con voluntarios recluidos en cuevas y otros cobayas humanos han demostrado que los patrones circadianos persisten en ausencia de luz solar. Se expresan en cada una de las células de nuestro cuerpo. Confinadas en una placa de Petri y sometidas a iluminación constante, las células humanas siguen con sus ciclos de 24 horas en punto a la actividad de sus genes, secreción de hormonas y producción de energía. Los ciclos, sólidamente establecidos, varían menos de un 1 por ciento: escasos minutos en el curso del día.

Pero si no se requiere la luz para establecer el ciclo circadiano, sí se precisa para sincronizar la fase de este reloj tan riguroso con los ciclos naturales de día y noche. Lo mismo que un reloj mecánico que se adelanta o se atrasa unos pocos minutos cada día, el reloj circadiano necesita un ajuste continuo para mantener su exactitud.

Gracias al progreso de la neurología conocemos la intervención de la luz solar en el ajuste del reloj. Desde hace tiempo se ha considerado que el lugar del reloj se halla en dos conjuntos de unas 10.000 células nerviosas del hipotálamo. Tras decenios de investigación con animales se ha demostrado que los centros en cuestión, o núcleos supraquiasmáticos (NSQ), controlan las fluctuaciones diarias de la presión arterial, la temperatura corporal y el estado de vigilia. Los NSQ indican también a la glándula pineal del cerebro cuándo debe liberar melatonina, que promueve el sueño en el hombre y se segrega sólo por la noche.

A comienzos del año en curso varios grupos de investigadores comprobaron que, en la retina, determinadas células especializadas transmitían información sobre los niveles de luz a los NSQ. Tales células —un subgrupo de ellas se denominan células ganglionares— operan con independencia absoluta de los conos y bastoncillos, estructuras que median la visión y son mucho menos sensibles a cambios rápidos de luz. Esta morosidad conviene a un sistema circadiano.

Pero el papel de los NSQ en los ritmos circadianos se está reconsiderando a la vista de otros hallazgos. No hace mucho, se admitía que los NSQ coordinaban los relojes celulares de los órganos y tejidos de nuestro cuerpo. A mediados de los noventa se descubrieron cuatro genes críticos que gobiernan el ciclo circadiano de la mosca, de los ratones y del hombre. Los genes reguladores no se limitan a controlar los NSQ, sino todo el resto también. Constituyó esa observación una novedad. No se esperaba que esos relojes genéticos se expresaran en todo el organismo, en todos los tejidos.

En la Universidad de Harvard acaba de mostrarse que la expresión de más de 1000 genes de tejido cardíaco y hepático de ratones varía en períodos regulares de 24 horas. Pero los genes que revelaban la presencia de estos ciclos circadianos, amén de diferir de un tejido a otro, alcanzaban el apogeo de su expresión en horas diferentes en el corazón y en el hígado.

Se ha demostrado que los horarios específicos de alimentación pueden alterar la fase del reloj circadiano del hígado, ignorando el ritmo de luz y oscuridad seguido por los NSQ. Cuando a las ratas de laboratorio, que habitualmente comen a voluntad, se da el alimento sólo una vez al día, por ejemplo, la expresión máxima de un gen temporal del hígado se desplazó 12 horas, mientras que el mismo gen temporal de los NSQ permaneció anclado en sincronía con la luz solar. Tiene sentido que los ritmos horarios de alimentación afecten al hígado, dado su papel en la digestión. Y se sospecha que los relojes circadianos en otros órganos y tejidos podrían responder a otros estímulos foráneos —estrés, ejercicio físico y cambios de temperatura— que ocurren de manera regular con periodicidad de 24 horas. Nadie está dispuesto a destronar a los NSQ: su autoridad sobre la temperatura corporal, la

presión arterial y otros ritmos fundamentales continúa incuestionable. Pero junto a ese centro cerebral, hay osciladores en otros órganos que operan por su cuenta.

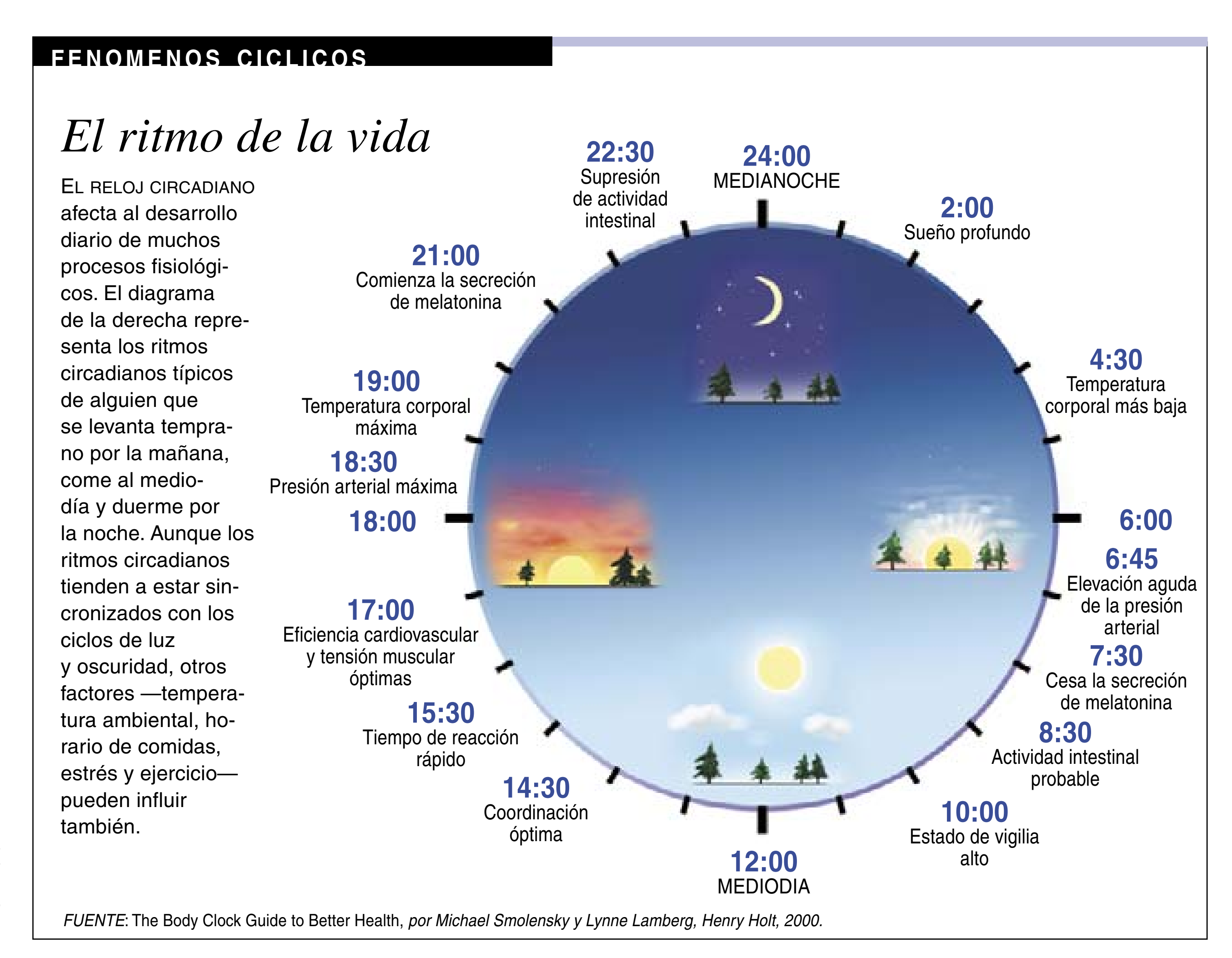
La autonomía de los relojes periféricos ayuda a explicar los trastornos asociados al cambio brusco de husos horarios luego de un largo viaje. Mientras que el cronómetro de intervalo puede reajustarse en un instante, en el ajuste de los ritmos circadianos se tardan días y a veces semanas tras el cambio repentino en la duración del día o en el huso horario. Una nueva percepción de la luz reajusta lentamente el reloj de los NSQ. Pero no tienen por qué seguir su ejemplo los otros relojes. El cuerpo se halla desfasado en un número elevado de ritmos diferentes.

Posiblemente, la sensación de cansancio y confusión provocada por el cambio de huso no perdura porque todos esos instrumentos acaban por sincronizarse de nuevo. Pero los operarios que cambian sus turnos, los noctámbulos habituales, los estudiantes y otras aves nocturnas se enfrentan a un cronodilema más serio. Pueden estar arrastrando una suerte de doble vida fisiológica. Incluso aunque echen una cabezada que otra durante el día, sus ritmos centrales continúan gobernados por los NSQ, razón por la cual las funciones básicas siguen "durmiendo" por la noche. Se puede forzar el ciclo del sueño y dormir antes o después, pero no se puede establecer que los niveles de melatonina o de cortisol y las variaciones de temperatura corporal se alcancen antes o después.

En el ínterin, los horarios de comida y actividad física podrían ajustar los relojes periféricos a fases totalmente distintas del ciclo de vigilia y de sueño o el ciclo de la luz y oscuridad. Con su organismo viviendo en tantos husos horarios distintos al mismo tiempo, no debe sorprendernos que los obreros sujetos a cambios de turnos sufran una incidencia mayor de enfermedades cardíacas, problemas gastrointestinales y, por supuesto, trastornos del sueño.

Un reloj para todas las estaciones

El desajuste provocado por los viajes intercontinentales y los cambios de turno son condiciones excepcionales, en las que el reloj circadiano innato sufre una brusca alteración y desfase con respecto a sus ciclos de luz y oscuridad o de sueño y vigilia. Sin embargo, eso mismo acontece en el curso del año, si bien con menos brusquedad, al cambiar las estaciones. Aunque la hora de acostarse cambie, las personas tienden a levantarse a la misma hora. Durante el invierno, en las latitudes septentrionales, eso signi-



El ritmo de la vida

El reloj circadiano afecta al desarrollo diario de muchos procesos fisiológicos. El diagrama de la derecha representa los ritmos circadianos típicos de alguien que se levanta temprano por la mañana, come al mediodía y duerme por la noche. Aunque los ritmos circadianos tienden a estar sincronizados con los ciclos de luz y oscuridad, otros factores —temperatura ambiental, horario de comidas, estrés y ejercicio— pueden influir también.

FUENTE: The Body Clock Guide to Better Health, *por Michael Smolensky y Lynne Lamberg, Henry Holt, 2000.*

fica que mucha gente se despierta dos o tres horas antes del alba. Su ciclo de sueño y vigilia se halla a varios husos horarios de distancia de los estímulos que le llegan de la luz solar.

La falta de correspondencia entre la duración del día y la vida cotidiana podría explicar el trastorno afectivo estacional, o TAE. En los Estados Unidos, el TAE aflige a uno de cada 20 adultos, que presentan aumento de peso, apatía, cansancio y otros síntomas depresivos, entre los meses de octubre y marzo. La frecuencia del síndrome en el norte decuplica la registrada en el sur. Aunque el TAE ocurre de manera estacional, algunos especialistas sospechan que se trata en realidad de un problema circadiano. Para Alfred Lewy, de la Universidad de Oregón, los pacientes de TAE saldrían de su depresión si se pudieran levantar a la hora del alba natural en el invierno; pues no se trataría tanto de una patología cuanto de la manifestación de un ritmo estacional adaptado en ciclos de sueño y vigilia.

Los humanos son los organismos menos sensibles al cambio de las estaciones. El TAE carece de significación si lo comparamos con los ciclos anuales que experimentan otros animales: hibernación, migración, muda del pelo y, sobre el apareamiento, metrónomo por excelencia al que se acomodan los demás ciclos. Es posible que estos ciclos estacionales se hallen regulados también por el reloj circadiano, que está equipado para registrar la duración de días y noches. La oscuridad, en la forma en que es detectada por los NSQ y la glándula pineal, prolonga la producción de melatonina en las largas noches del invierno y las reduce en el verano. Los hámsters perciben la diferencia entre un día de 12 horas, cuando sus gónadas no crecen, y un día de 12 horas y quince minutos, cuando sus gónadas empiezan a hacerlo.

Si los ritmos estacionales ejercen semejante influencia en otros animales, y si el hombre dispone del equipo para expresarlos, ¿por qué entonces los hemos perdido? Quizá no los tuvimos nunca. Hemos evolucionado en los trópicos. Y muchos animales tropicales no presentan patrones ostensibles de comportamiento anual. No los precisan, pues las estaciones varían muy poco. La mayoría de los animales tropicales se aparean sin relación con las estaciones porque no existe un "tiempo óptimo" para parir. Las personas, también, están siempre en celo. A medida que nuestros antepasados adquirieron un mayor control sobre el entorno, las estaciones irían perdiendo significación como fuerza evolutiva.

En la fertilidad humana existe un rasgo cíclico: las mujeres y otras hembras de los primates ovulan sólo una vez al mes. El reloj que regula la ovulación y la menstruación constituye un bucle químico de retroalimentación, bien documentado, que puede ser manipulado mediante tratamiento hormonal, ejercicio e incluso por la presencia de otras mujeres que estén menstruando. Pero se desconoce la razón que determina la duración específica del ciclo menstrual. El hecho de tener la misma duración que el ciclo lunar es una coincidencia que pocos se han preocupado en investigar y no digamos explicar. Hasta ahora, no se ha hallado ningún nexo convincente entre la energía radiante o gravitatoria de la Luna y las hormonas de la reproducción en la mujer. En ese respecto, el reloj menstrual de cada mes sigue envuelto en el misterio.

La venganza del tiempo

A menudo se tiende a equiparar el envejecimiento con las enfermedades de la vejez —cáncer, cardiopatías, osteoporosis, artritis, enfermedad de Alzheimer, por nombrar algunas— como si bastara la ausencia de enfermedad para con-

RELOJES ESTACIONALES



Gira y gira

La mayoría de los animales experimentan ciclos estacionales muy ostensibles: migran, hibernan, se aparean y mudan la piel en momentos específicos del año (*las cuatro primeras fotografías*). Los testículos del hámster cuadruplican su tamaño en la época de celo. Estos ciclos se hallan consolidados: las ardillas enjauladas siguen hibernando al llegar la estación, aun cuando se mantengan a temperatura constante y períodos invariables de luz y oscuridad. También las aves retenidas en condiciones estables de laboratorio se muestran inquietas cuando llega la hora de la migración y mudan y engordan en ciclos anuales. El único vestigio estacional en el hombre puede ser el trastorno afectivo estacional, un ataque de depresión anual que afecta a algunos individuos en el invierno y puede remediarse con fototerapia (*fotografía inferior*) o simplemente durmiendo hasta que salga el sol.

TOM DRAPER DESIGN; FRANS LANTING *Minden Pictures* (*cisnes y mariposas*); GEORGE MCCARTHY *Corbis* (*ratón*); MARK JONES *Minden Pictures* (*pingüino*); NAJLAH FEANNY *SABA* (*fototerapia*)

ferir inmortalidad. La biología propone todo lo contrario.

En los países desarrollados la esperanza de vida supera los 70 años; en ciertas moscas, ese factor es de un día solo. De tales discrepancias entre especies se ocupa ahora la biología. Mas, si nuestros días están contados, ¿qué es lo que lleva la cuenta?

En un encuentro reciente organizado por el norteamericano Instituto Nacional de Envejecimiento los participantes cuestionaron muchos de los tópicos que se esgrimen sobre los factores determinantes de la duración natural de la vida. La respuesta no puede situarse exclusivamente en la genética de la especie: una abeja obrera vive meses; la reina, años. Pero la genética importa. La mutación en un solo gen del ratón puede producir una cepa que viva hasta un 50 por ciento más tiempo que la media. Una tasa metabólica alta puede acortar la vida media; pese a lo cual, muchas especies de aves, que tienen un metabolismo acelerado, viven más en comparación con los mamíferos de talla equiparable. Y animales de gran tamaño, lentos en su metabolismo, no duran necesariamente más que los animales pequeños. La esperanza de vida de un loro viene a coincidir con la del hombre. Si consideramos los perros, las razas pequeñas suelen alcanzar mayor edad que las razas grandes.

La investigación en torno al arco vital humano acostumbra ceñirse al plano celular, no al organismo en su totalidad. Hasta ahora lo más cercano a un reloj que marca nuestra hora es lo que se ha dado en llamar el reloj mitótico. Este reloj marca el paso de la división celular, o mitosis, el proceso por el que una célula se divide en dos. Podemos compararlo con un reloj de arena en el que cada grano representara un episodio de la división celular. De igual manera que hay un número finito de granos en la ampollita, parece que existe un tope en el número de veces que las células normales puede dividirse. En un cultivo el guarismo se halla entre 60 y 100 divisiones mitóticas, para dar luego por concluso el proceso. Estas células respiran, metabolizan, se mueven, pero no volverán a dividirse.

En general, las células de cultivo alcanzan su estado de senescencia en unos pocos meses. Por fortuna, la mayoría de las células de nuestro organismo se dividen mucho más despacio que las células cultivadas. Aunque también llega un momento —tal vez después de unos 70 años más o menos— en que se detienen. Pero lo que las células cuentan no es el tiempo cronológico, sino el número de mitosis.

En 1997 John Sedivy, de la Universidad de Brown, mostraba que, con una mutación génica, podían lograrse 20 o 30 ciclos más en el proceso divisor de los fibroblastos humanos. Se trata del gen que determina la proteína p21, que responde a cambios en los telómeros, estructuras situadas en el extremo de los cromosomas. Telómeros y genes están hechos de ADN. Los primeros constan de millares de repeticiones de una secuencia de seis bases del ADN que no codifica ninguna proteína conocida. En cada división celular se pierden segmentos teloméricos. En el embrión humano los telómeros miden de 18.000 a 20.000 bases de longitud. Cuando se llega a la senescencia, a los telómeros les quedan sólo de 6000 a 8000 bases.

Por eso la biología supone que las células entran en senescencia cuando la extensión del telómero cae por debajo de cierto valor. Titia de Lange, de la Universidad de Rockefeller, ha propuesto una nueva explicación para ese posible nexo. En una célula sana, mostró, los extremos del cromosoma se retropliegan sobre sí mismos, a la manera de una mano introducida en el bolsillo. La “mano” sería las últimas 100 o 200 bases del telómero, que es monocatenario; por tanto, sin emparejamiento. Con la ayuda de una docena larga de proteínas especiales, el extremo monocatenario se inserta en las dobles cadenas que le preceden, en busca de protección.

Si se permite que los telómeros se acorten hasta determinada longitud, no podrán valerse de ese mecanismo abrigador. Desplegado, el telómero monocatenario queda al albur de una posible fusión con otros extremos monocatenarios. La fusión causa estragos en una célula, al uncir todos los cromosomas. Por eso las células con una mutación en p21 que consiguió Sedivy mueren después de entrar en unos cuantos ciclos adicionales de mitosis. Otras células cultivadas para que no se aperciban de los telómeros cortos se tornan cancerosas. En realidad, la senescencia celular podría prolongar la vida humana, en vez de determinar su decadencia. Podría tratarse de un mecanismo imperfecto de defensa frente al cáncer y la muerte segura.

De momento, el nexo entre telómeros acortados y envejecimiento parece, en el mejor de los casos, un tanto tenue. La mayoría de las células no necesitan seguir dividiéndose para llevar a cabo su tarea.

En todo caso, la pérdida telomérica constituye uno más de los numerosos tributos que deben pagar las células al dividirse. La integridad del ADN suele resentirse en la replicación desarrollada durante la mitosis. Las células van acumulando así numerosos errores genéticos, aunque los genes relacionados con el envejecimiento en animales y en las personas codifican a menudo proteínas que evitan o reparan esos errores. La división celular constituye una empresa muy arriesgada.

Bibliografía complementaria

THE BODY CLOCK GUIDE TO BETTER HEALTH. Michael Smolensky y Lynne Lamberg. Henry Holt and Company, 2000.

NEUROPSYCHOLOGICAL MECHANISMS OF INTERVAL TIMING BEHAVIOR. Matthew S. Matell y Warren H. Meck en *Bioessay*, vol. 22, n.º 1, págs. 94-103; enero de 2000.

THE EVOLUTION OF BRAIN ACTIVATION DURING TEMPORAL PROCESSING. Stephen M. Rao, Andrew R. Mayer y Deborah L. Harrington en *Nature Neuroscience*, vol. 4, n.º 3, págs. 317-323, marzo de 2001.

THE LIVING CLOCK. John D. Palmer. Oxford University Press, 2002.

El tiempo mental

En su cómputo intervienen diversas estructuras cerebrales, que organizan cronológicamente nuestros recuerdos

Antonio R. Damasio

El despertador nos levanta a una hora determinada; el día entero lo viviremos a partir de ese momento gobernados por el tiempo: reuniones, visitas, conferencias telefónicas, almuerzos, citas establecidas a una determinada hora. Podemos coordinar nuestras propias actividades con las de otros porque todos, implícitamente, estamos de acuerdo en seguir un mismo sistema para medir el tiempo, el que se basa en la inexorable salida y puesta del Sol. En el curso de la evolución, los seres humanos han desarrollado un reloj biológico sincronizado con ese ritmo alternante de luz y oscuridad. Está en el hipotálamo del cerebro y gobierna lo que yo llamo "tiempo corporal".

Pero hay también otro tipo de tiempo. "El tiempo mental" es el correspondiente a nuestra experiencia del paso del tiempo y nuestra organización cronológica del mismo. A pesar del continuo tic-tac del reloj, el paso del tiempo puede parecer rápido o lento, corto o largo. Y esta variabilidad se da a diferentes escalas, se trate de décadas, estaciones, semanas y horas, o de los más breves intervalos de la música (la duración de una nota o el momento de silencio entre dos notas). También situamos los acontecimientos en el tiempo, decidiendo cuándo ocurrieron, en qué orden y a qué escala, si la de toda una vida o la de unos segundos.

No sabemos todavía cómo se relaciona el tiempo mental con el reloj biológico del cuerpo. Tampoco tenemos claro si depende de un solo mecanismo marcador del tiempo o si nuestras experiencias de duración y orden temporal se basan primariamente, o puede que hasta exclusivamente, en un procesamiento de información. En el caso de que sea esto último, el tiempo mental lo determinarán la atención que prestemos a lo que suceda y las emociones que nos haga sentir. Estará también influenciado por la manera en que registramos lo sucedido y las inferencias que hacemos cuando lo percibimos y recordamos.

Tiempo y memoria

A los problemas del procesamiento del tiempo me llevó inicialmente mi trabajo con pacientes neurológicos. Quienes tienen dañadas las regiones cerebrales relacionadas con el aprendizaje y el recuerdo de nuevos hechos desarrollan importantes alteraciones en su capacidad de situar los sucesos del pasado en la época y secuencia correctas. Más aún, estos amnési-

IRAIDA ICAZA



cos ya no saben evaluar con precisión el paso del tiempo en las escalas de horas, meses, años y décadas. Su reloj biológico, por otro lado, a menudo permanece intacto, lo mismo que su capacidad de notar breves duraciones de tiempo de un minuto o menos y ordenarlas correctamente. Las experiencias de estos pacientes sugieren, como mínimo, que el procesamiento del tiempo y ciertos tipos de memoria deben compartir algunas vías neurológicas.

La asociación entre amnesia y tiempo es más evidente en los casos en que hay daños permanentes en el hipocampo, una región del cerebro importante para la memoria, y en el vecino lóbulo temporal, la región a través de la cual el hipocampo mantiene una comunicación bidireccional con el resto de la corteza cerebral. Una lesión del hipocampo impide el establecimiento de nuevos recuerdos. La capacidad de formar recuerdos es un componente indispensable para que adquiramos un sentido de nuestra propia cronología. Construimos nuestra línea de tiempo suceso a suceso y conectamos las cosas que nos pasan con lo que ocurre a nuestro alrededor. Los pacientes cuyo hipocampo no funciona son incapaces de recordar mucho más de un minuto las cosas que vayan pasando. Se dice que padecen de amnesia anterógrada.

Curiosamente, los recuerdos que el hipocampo ayuda a formar no se almacenan en él. Se distribuyen por redes de neuronas localizadas en diferentes zonas de la corteza cerebral (lóbulo temporal incluido), relacionadas con el tipo de material que se esté recordando: hay áreas dedicadas a impresiones visuales, sonidos, información táctil, etc. Estas redes deben activarse tanto para archivar como para recuperar un recuerdo. Cuando se dañan, los pacientes no pueden recuperar memorias lejanas; es la amnesia retrógrada. Precisamente, los recuerdos que más se pierden en ésta son los que llevan estampillado un sello temporal: sucesos únicos que ocurrieron en un determinado contexto y en una determinada ocasión. Un ejemplo de recuerdo que lleva un sello temporal es el de nuestra propia boda. Un tipo diferente, aunque afín, de recuerdo, el del concepto mismo de matrimonio, no guarda relación con el tiempo. El lóbulo temporal que rodea al hipocampo es fundamental para la formación y recuperación de este otro tipo de recuerdos.

En pacientes con la corteza del lóbulo temporal del cerebro lesionada se pueden borrar años e incluso décadas de memoria autobiográfica. La encefalitis vírica, la apoplejía y la enfermedad de Alzheimer se cuentan entre las dolencias neurológicas responsables de las incapacidades más profundas.

En uno de esos pacientes, a quien mis colegas y yo hemos estudiado durante más de 25 años, el lapso de tiempo perdido abarca casi hasta la cuna. A los 46 años se le lesionaron ambos hipocampos y partes del lóbulo temporal. En consecuencia, padecía tanto amnesia anterógrada como retrógrada: no puede formar nuevos recuerdos factuales, ni recordar los antiguos. Habita en un presente permanente, incapaz de recordar ni lo que pasó hace un minuto, ni lo que sucedió hace 20 años.

No tiene en realidad ningún sentido del tiempo. No puede decirnos la fecha del momento presente; cuando se le pide que la adivine sus respuestas son disparatadas; puede hablar lo mismo de 1942 que de 2013. En cuanto a la hora, acierta más si tiene cerca una ventana; se basa en la luz y en las sombras. Pero sin un reloj o una ventana, no distingue la mañana de la tarde, ni la noche del día; el reloj del tiempo corporal no le ayuda. Tampoco puede decir su edad. Intenta adivinarla, pero generalmente se equivoca.

Dos de las pocas cosas concretas que tiene claras son que estaba casado y tiene dos hijos. Pero, ¿cuándo se casó? ¿Cuándo nacieron los hijos? No lo sabe. Tampoco sabe orientarse en la línea cronológica de su familia. Ciertamente estuvo casado, pero su esposa se divorció de él hace más de veinte años. Sus hijos hace tiempo que se casaron y le han dado nietos.

El sello temporal

Se desconoce de qué manera asigna el cerebro un acontecimiento a un tiempo específico y lo sitúa en una secuencia cronológica, o por qué, como en el caso de mi paciente, deja de hacerlo. Sólo sabemos que intervienen tanto la memoria de hechos como la memoria de las relaciones espaciales y temporales entre los hechos. Por ello, Daniel Tranel y Robert Jones, compañeros míos de la Universidad de Iowa, y yo decidimos investigar cómo se establece la línea cronológica autobiográfica. Analizando pacientes con diferentes tipos de impedimentos de memoria esperábamos identificar la región o regiones del cerebro requeridas para situar los recuerdos en su momento correcto.

Seleccionamos cuatro grupos de participantes, 20 personas en total. El primer grupo estaba formado por pacientes con amnesia debida a alguna lesión del lóbulo temporal; el segundo, por pacientes con amnesia producida por daños en el prosencéfalo basal, otra área importante

Resumen

- Se sabe cómo el organismo controla el tiempo mediante ritmos circadianos, pero todavía se ignora de qué forma se las arregla el cerebro para situar lo sucedido en una secuencia cronológica correcta.
- Algunos estudios recientes indican que en la organización del "tiempo mental" participan varias estructuras cerebrales, como el hipocampo, el prosencéfalo basal y el lóbulo temporal.

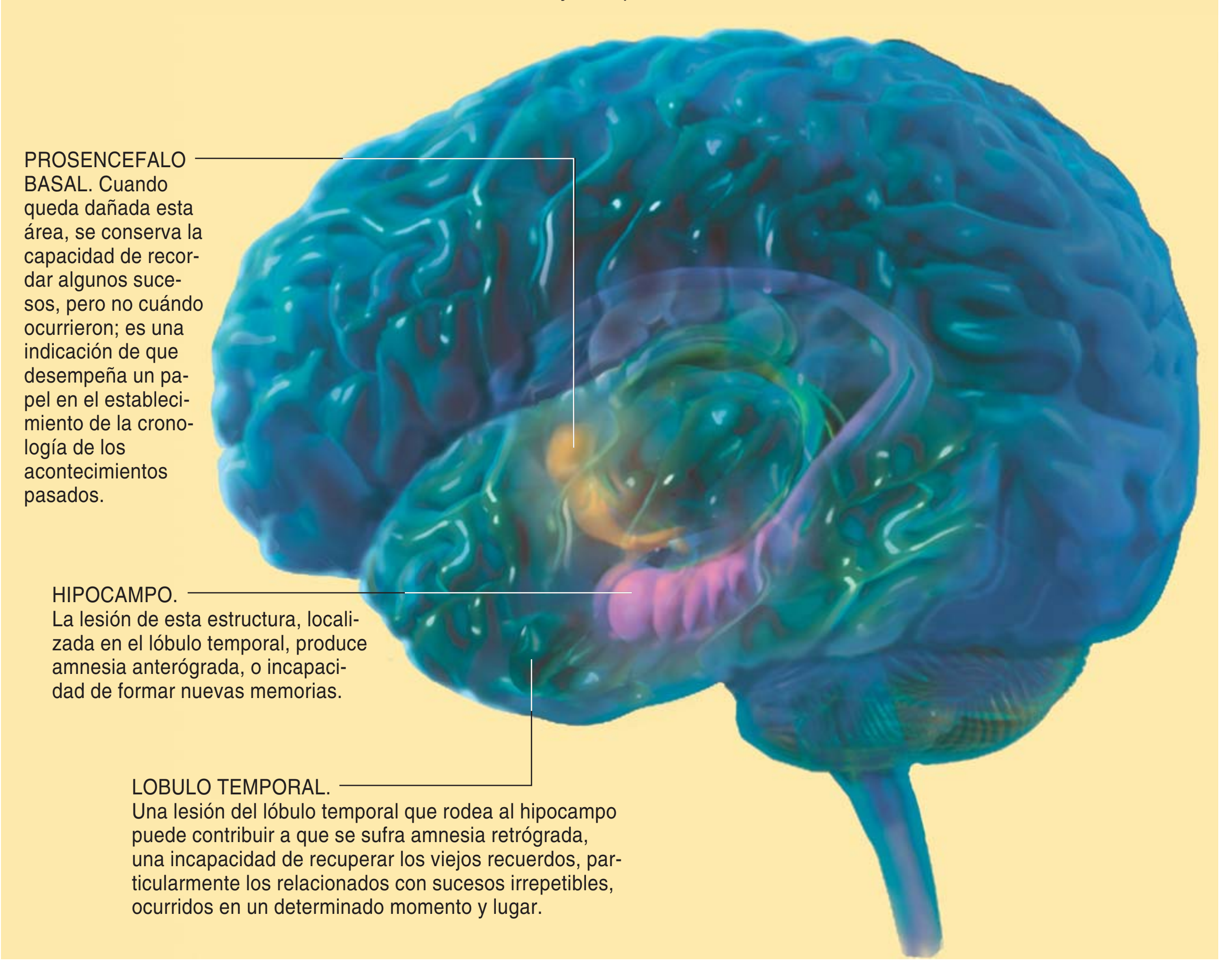
El autor

ANTONIO R. DAMASIO ocupa la cátedra M. W. Van Allen de la facultad de medicina de la Universidad de Iowa, cuyo departamento de neurología dirige; es además profesor adjunto del Instituto Salk de Estudios Biológicos de La Jolla, California. Es conocido por sus estudios de los trastornos neurológicos de la mente y del comportamiento; ha escrito tres libros.

FUNDAMENTOS SOBRE EL CEREBRO

Saber cuándo

Los estudios de pacientes con lesiones cerebrales dan a entender que determinadas estructuras del lóbulo temporal y del prosencéfalo basal desempeñan un papel importante en guardar y recuperar la información relativa a cuándo ocurrieron las cosas y en qué orden.



CAROL DONNER

para la memoria; el tercero, por pacientes sin amnesia, pero con dolencias en zonas del cerebro que no eran el lóbulo temporal o el prosencéfalo basal. Elegimos como grupo de control a sujetos sin enfermedades neurológicas, de memoria normal; se los emparejó con los pacientes según la edad y el nivel educativo.

Cada participante rellenó un detallado cuestionario sobre aspectos fundamentales de su vida. Preguntamos sobre padres, hermanos y parientes, educación, amigos y actividades profesionales. Verificamos sus respuestas con familiares y documentos. Comprobamos también qué recordaban los participantes de acontecimientos públicos importantes, de elecciones políticas, guerras y otros desastres, de fenómenos culturales prominentes. Pedimos luego a cada uno que situase una tarjeta normalizada que describía un determinado suceso personal o público en el lugar pertinente de una línea cronológica, año tras año y decenio a decenio, del siglo XX. Para los participantes, la situación era parecida a un juego. Para los investigadores, medía la precisión con que se situaban los hechos en el tiempo.

Como era de esperar, los pacientes amnésicos actuaron de modo diferente de los sujetos de control. Estos se mostraron, hasta cierto punto, precisos en sus localizaciones temporales: su error medio fue de alrededor de 1,9 años. Los pacientes amnésicos fallaron mucho más, sobre todo los que tenían dañado el prosencéfalo basal: aunque recordasen el suceso con detalle, al situarlo en el tiempo se equivocaban, en promedio, en 5,2 años. Su recuerdo de los sucesos, eso sí, superaba al de quienes tenían mal el lóbulo temporal, los cuales, en cambio, eran más precisos en la localización en el tiempo: de media, erraban en tan sólo 2,9 años.

¿Qué sugieren estos resultados? Al autor, que recordar un hecho y

La dilatación del tiempo en La soga*, de Hitchcock*



Quizá se aprecie mejor la elasticidad del tiempo cuando se asiste al cine, al teatro, a un concierto o a una conferencia. La duración real de un espectáculo y su duración mental son cosas diferentes. Para ilustrar los factores que contribuyen a esta variable experiencia del tiempo no se me ocurre un ejemplo mejor que la película de Alfred Hitchcock *La soga,* de 1948. La filmó en tomas continuas de 10 minutos. Orson Welles en *Sed de mal*, Robert Altman en *El juego de Hollywood* y Martin Scorsese en *Uno de los nuestros* hicieron tomas continuas largas, pero ninguna tan larga como las de *La soga.* A pesar de los muchos aplausos que esta innovación proporcionó al director, la filmación resultó una pesadilla para todos los implicados, por lo que Hitchcock sólo volvió a utilizarla en una parte de su siguiente película, *Atormentada*.

Hitchcock tuvo una buena razón para inventar esta técnica. Tenía que rodar una historia que sucedía en tiempo real. Pero estaba limitado por la cantidad de película que podía cargarse en la cámara, suficiente tan sólo para unos 10 minutos de filmación.

Veamos ahora cómo transcurre en nuestras mentes el tiempo real de *La soga*. En una entrevista con François Truffaut, en 1966, Hitchcock señaló que la historia empieza a las siete y media de la tarde y acaba a las nueve y cuarto, 105 minutos después. Pero la película consistía en ocho rollos de 10 minutos cada una, en total 81 minutos, incluyendo los títulos de crédito del principio y final. ¿Adónde fueron a parar los 25 minutos que faltan? ¿Sentimos que pasa menos tiempo que 105 minutos cuando vemos la película? En absoluto. La película nunca parece más corta de lo que debiera, y el espectador no tiene tampoco la sensación de apresuramiento o recorte. Al contrario, a mucha gente le parece incluso más larga de lo que dura realmente la proyección.

Sospecho que varios aspectos de la película explican la alteración en el tiempo percibido. En primer lugar, la mayor parte de la acción se desarrolla en la sala de estar de un ático, en verano, con Nueva York visible al fondo a través de una ventana panorámica. Al principio de la película la luz sugiere que es el atardecer, pero al final se ha hecho de noche. Nuestra experiencia cotidiana del oscurecimiento progresivo de la tarde nos hace percibir la acción en tiempo real de la película como si se prolongase lo suficiente para abarcar las varias horas que han de transcurrir antes de que llegue la noche, cuando en realidad esos cambios de luz han sido artificialmente acelerados por Hitchcock.

Del mismo modo, la naturaleza y contexto de la acción representada originan también otros juicios espontáneos sobre el tiempo. Tras el proverbial asesinato de las películas de Hitchcock, que aquí tiene lugar al principio del primer rollo, la historia transcurre en una elegante cena en casa de los dos asesinos, a la que asisten los parientes y amigos de la víctima. El tiempo en que se sirve la cena es más o menos el correspondiente a dos rollos de filmación. Pero los espectadores atribuyen un lapso mayor a la secuencia porque sabemos que ni los anfitriones ni los invitados, que parecen formales, educados y sin prisas, engullirían la comida a tal velocidad. Cuando, más tarde, la acción se divide (algunos invitados conversan frente a la cámara en la sala de estar, mientras otros se reúnen en el comedor para mirar libros raros), es razonable que atribuyamos a lo que ocurre fuera de la cámara una mayor duración que esos pocos minutos que tiene realmente en la película el episodio.

Otro factor puede contribuir también a la deceleración del tiempo. No hay saltos entre los rollos de 10 minutos.



LA LUZ DE FONDO DE *LA SOGA* se desvanece más rápidamente que en la vida real, pero los espectadores perciben que la noche llega a su debido momento. Por tanto, el tiempo se les hace más largo que la duración real de la película.

La cámara se desliza lentamente hacia cada personaje y desde cada personaje. Pero para unir cada segmento al siguiente, Hitchcock acabó cada toma con un primer plano de un objeto. En la mayor parte de los casos, la cámara se mueve hacia la espalda de un actor que viste una chaqueta oscura y la pantalla se queda en negro unos segundos. La toma siguiente empieza con la cámara alejándose nuevamente de la espalda del actor. Aunque la interrupción es breve y no significa que haya un corte, puede contribuir sin embargo a la elongación del tiempo: solemos interpretar los cortes en la percepción visual como interrupciones de la continuidad temporal. Ciertos recursos cinematográficos, como el desvanecimiento de la imagen, a menudo hacen que el espectador infiera que ha pasado un tiempo entre la escena precedente y la siguiente. En *La soga*, cada uno de los siete cortes retrasa el tiempo real en una fracción de segundo. Pero su acumulación puede sugerir a algunos espectadores que ha pasado más tiempo.

Otro factor que puede alargar el tiempo es el contenido emocional de la obra. Cuando estamos disgustados o preocupados, el tiempo se nos hace más largo porque nos centramos en imágenes negativas asociadas a nuestra ansiedad. Los estudios efectuados en mi laboratorio muestran que el cerebro genera imágenes con mayor rapidez cuando tenemos emociones positivas (quizá por eso el tiempo vuela cuando nos lo estamos pasando bien) y más lentamente cuando sufrimos emociones negativas. Ese fue, por ejemplo, mi caso en un vuelo reciente, con grandes turbulencias; el tiempo se me hizo una eternidad al centrarse mi atención en el mal rato que estaba pasando. Es posible que la desagradable situación que nos presenta *La soga* contribuya de un modo similar a alargar la percepción del tiempo.

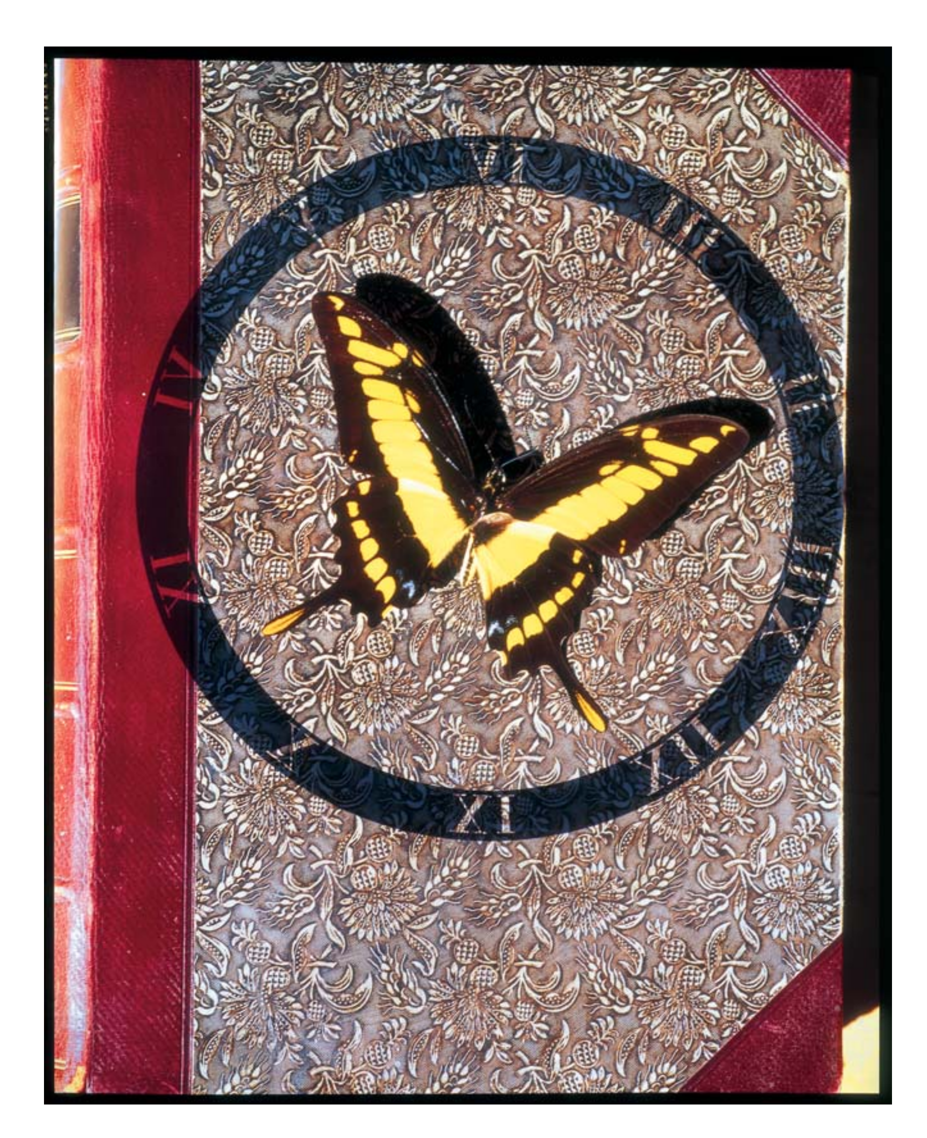
La soga es un caso notable de discrepancia entre el tiempo real y el que percibe el espectador. Con ello ilustra que la experiencia de la duración es una construcción basada en factores muy diversos, entre ellos el contenido de los sucesos que se perciben, las reacciones emocionales que suscitan y el modo en que se nos presentan las imágenes, así como las inferencias conscientes e inconscientes de que van acompañadas.

asignarle su lugar en el tiempo son procesos que cabe diferenciar. Pero quizá la conclusión más interesante que se deriva de los mismos sea el papel fundamental del prosencéfalo basal en el establecimiento del contexto que nos permite situar los recuerdos en su época correspondiente. Concuerda ello con las observaciones clínicas de los pacientes con lesiones en esa zona del cerebro. A diferencia de quienes tienen dañado el lóbulo temporal, son capaces de aprender hechos nuevos. Pero los recuerdan a menudo en un orden incorrecto, reconstruyendo la secuencia de lo sucedido mediante una narración ficticia que puede cambiar de una ocasión a otra.

La consciencia llega tarde

A diferencia de muchos de mis pacientes, la mayoría no tenemos que vérnoslas con grandes vacíos de memoria o confusiones cronológicas graves. Sin embargo, todos compartimos un extraño "desajuste temporal" mental, un fenómeno puesto de manifiesto por primera vez en el decenio de 1970 por el neurofisiólogo Benjamin Libet, de la Universidad de California en San Francisco. En un experimento observó un retraso entre el momento en que un individuo adquiría conciencia de que iba a flexionar uno de sus dedos (y registraba el instante exacto de esa toma de conciencia) y el momento en que sus ondas cerebrales reflejaban la inminencia de la flexión. La actividad cerebral ocurría un tercio de segundo antes de que la persona decidiera conscientemente mover su dedo. En otro experimento, se propuso averiguar si un estímulo aplicado directamente al cerebro producía sensaciones en alguno de sus pacientes quirúrgicos, que estaban conscientes, como ocurre en muchas de tales operaciones. Observó que una descarga eléctrica suave aplicada a la corteza cerebral causaba una sensación de hormigueo en la mano del paciente, medio segundo después de que se aplicase el estímulo.

Aunque la interpretación de estos experimentos, como de otros en el ámbito de los estudios de la conciencia, resulta controvertida, el trabajo de Libet sentó un hecho ge-





neral: existe un retraso entre el inicio de los fenómenos neurales que conducen a la conciencia y el momento en que se experimenta realmente la consecuencia de esos fenómenos.

A primera vista, este resultado puede parecer chocante, pese a que las razones del retraso son bastante claras. Se necesita un tiempo para que los cambios físicos que constituyen un acontecimiento incidan en el organismo y modifiquen los detectores sensoriales de un órgano, la retina, digamos. Lleva su tiempo que las modificaciones electroquímicas resultantes se transmitan como señales hasta el sistema nervioso central. Lleva su tiempo generar un modelo neural en los mapas sensoriales del cerebro. Y lleva su tiempo, finalmente, relacionar el mapa neural del acontecimiento y la imagen mental que de él surge con el mapa neural y la imagen del yo (la noción de quiénes somos), el último y crítico paso sin el cual el suceso nunca se integraría en la conciencia.

No estamos hablando más que de milisegundos, pero, aun así, hay un retraso. Esta situación es tan extraña que el lector quizá se pregunte por qué no somos conscientes de que se produce. Se cuenta con una explicación atractiva: puesto que todos tenemos cerebros parecidos que actúan de modo similar, todos adquirimos conciencia con un retraso ineludible, así que nadie lo nota. Pero puede que haya otras razones. En el procesamiento central de lo que va sucediendo, el cerebro puede establecer sus propias conexiones de tal modo que, a nivel microtemporal, “anticipe” algunos hechos; puede, así, parecer que los procesos retardados no se han retrasado tanto y que procesos con retardos diferentes se retrasan más o menos lo mismo.

Esta última posibilidad, que Libet tuvo presente, explicaría por qué mantenemos la ilusión de continuidad del tiempo y el espacio cuando nuestros ojos se mueven de un objeto a otro durante un cambio rápido de la dirección de la mirada. No notamos el contorno borroso que originan los movimientos de los ojos, ni el tiempo que lleva orientarlos de un lugar al otro. Según Patrick Haggard, del Colegio Universitario de Londres, y John C. Rothwell, del Instituto de Neurociencia Cognitiva de Londres, el cerebro adelanta el instante que se asigna a la percepción del objeto perseguido 120 milisegundos; de ese modo nos ofrece la sensación de una visión continua.

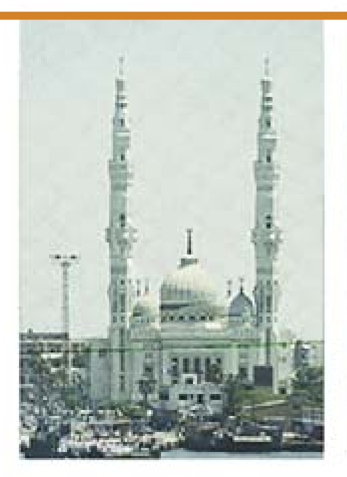
Que el cerebro corrija nuestras experiencias visuales, que imparta una impresión de volición una vez que las neuronas ya han actuado, es una muestra de su exquisita sensibilidad con respecto al tiempo. Aunque nuestra comprensión del tiempo mental es incompleta, poco a poco vamos sabiendo más sobre las razones de que percibamos el tiempo de una manera tan variable y por qué necesita el cerebro para crear una línea cronológica.

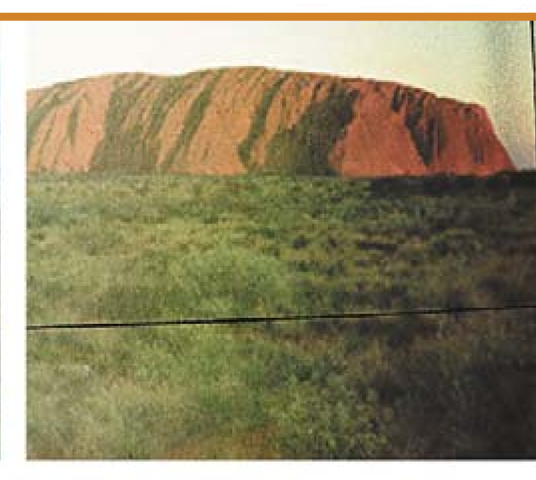
Bibliografía complementaria

FROM PHYSICAL TIME TO THE FIRST AND SECOND MOMENTS OF PSYCHOLOGICAL TIME. Simon Grondin en *Psychological Bulletin*, vol. 127, n.º 1, págs. 22-44; enero, 2001.

ILLUSORY PERCEPTIONS OF SPACE AND TIME PRESERVE CROSS-SACCADIC PERCEPTUAL CONTINUITY. Kielan Yarrow, Patrick Haggard, Ron Heal, Peter Brown y John C. Rothwell en *Nature*, vol. 414, págs. 302-305; 15 de noviembre, 2001.

TIME PERCEPTION: BRAIN TIME OR EVENT TIME? Alan Johnston y Shin’ya Nishida en *Current Biology*, vol. 11, n.º 11, págs. R427-R430; 2001.





El tiempo cultural

¿Qué es el tiempo? La respuesta varía de unas sociedades a otras

Carol Ezzell

En Brasil, una hora de retraso no es causa de censura; en Nueva York, cinco o diez minutos requieren una explicación. Elástico en muchas culturas, el tiempo es en otras rígido y estricto. De hecho, la forma en que los miembros de una cultura perciben y utilizan el tiempo refleja las prioridades de su sociedad e, incluso, de su concepción del mundo.

Los sociólogos han observado amplias diferencias en el ritmo de la vida entre distintos países, así como en la forma en que sus sociedades entienden el tiempo, que puede ser como una flecha que atraviesa el futuro, o quizá como una rueda en rotación, en la que pasado, presente y futuro se repiten en ciclos sin fin. En algunas culturas, el tiempo y el espacio se fusionan: la "Ensoñación" de los aborígenes australianos no sólo incluye un mito sobre la creación, sino también un método para orientarse por su territorio. Resulta interesante, empero, que ciertas formas de entender el tiempo, como la de que es aceptable que el individuo poderoso pueda hacer esperar a las personas de inferior rango, hayan traspasado las fronteras culturales y parezcan ubicuas.

El estudio del tiempo y de la sociedad puede ser dividido en pragmático y cosmológico. En el lado práctico, el antropólogo Edward T. Hall, Jr., escribió, hace medio siglo, que para una cultura dada las reglas del tiempo social constituían un "lenguaje mudo". Sus reglas pudieran no estar siempre explícitamente enunciadas, afirmó, sino hallarse en el ambiente; ser familiares y cómodas o desconocidas y erróneas.

En 1955, Hall describió en *Scientific American* la forma en que diferentes percepciones del tiempo pueden producir malentendidos entre personas de culturas sin conexión. "Un embajador a quien un visitante extranjero ha hecho esperar más de media hora debe comprender que si su visitante 'se limita a musitar una disculpa', eso no se trata necesariamente de un insulto", escribía. "El sistema de tiempo en un país extraño puede estar compuesto por unidades básicas totalmente distintas, por lo que la visita quizá no se retrasó tanto como podría parecernos. Es preciso conocer el sistema de tiempo del país para saber en qué momento son verdaderamente necesarias las disculpas... Lo que ocurre es que en culturas distintas se concede diferente valor a las unidades de tiempo."


STUART BRADFORD



En la actualidad, casi todas las culturas de todas las partes del mundo cuentan con relojes y calendarios, que integran a la mayor parte del planeta en un mismo ritmo general de tiempo. Pero eso no quiere decir que todos vayamos al mismo paso. Robert V. Levine, profesor de psicología social de la Universidad de California en Fresno, asegura que el estudio de la forma en que cada cultura entiende el tiempo proporciona una maravillosa visión. Ofrece respuestas sobre sus valores y creencias. Merced a él podemos hacernos una idea muy correcta de lo que importa en cada una.

Levine, que ha investigado el ritmo de la vida en 31 países, expone en *A Geography of Time* sus criterios para clasificar los países atendiendo a tres medidas: la velocidad con que se camina por las aceras de las urbes, lo que tarda un empleado de correos en proporcionar un sello corriente y la precisión de los relojes públicos. Basándose en estas variables, llega a la conclusión de que los cinco países donde más se aprieta el paso son Suiza, Irlanda, Alemania, Japón e Italia: los cinco más pausados, Siria, El Salvador, Brasil, Indonesia y México.

Kevin K. Birth, antropólogo del Queens College, ha examinado la percepción del tiempo en Trinidad. El título del libro que recoge su trabajo, *Any Time Is Trinidad Time: Social Meanings and Temporal Consciousness*, alude a una frase corrientemente utilizada allí para disculpar los retrasos. En aquel país, señala, "si hay una reunión a las 6:00 de la tarde, la gente se presenta a las 6:45 o las 7:00". Allí, "la hora es cualquier hora". Aunque no del todo. Si de negocios se trata, el retraso sólo se le permite al poderoso; al subalterno se le exige puntualidad. El vínculo entre poder y el tiempo que se hace esperar es válido también en otras muchas culturas.

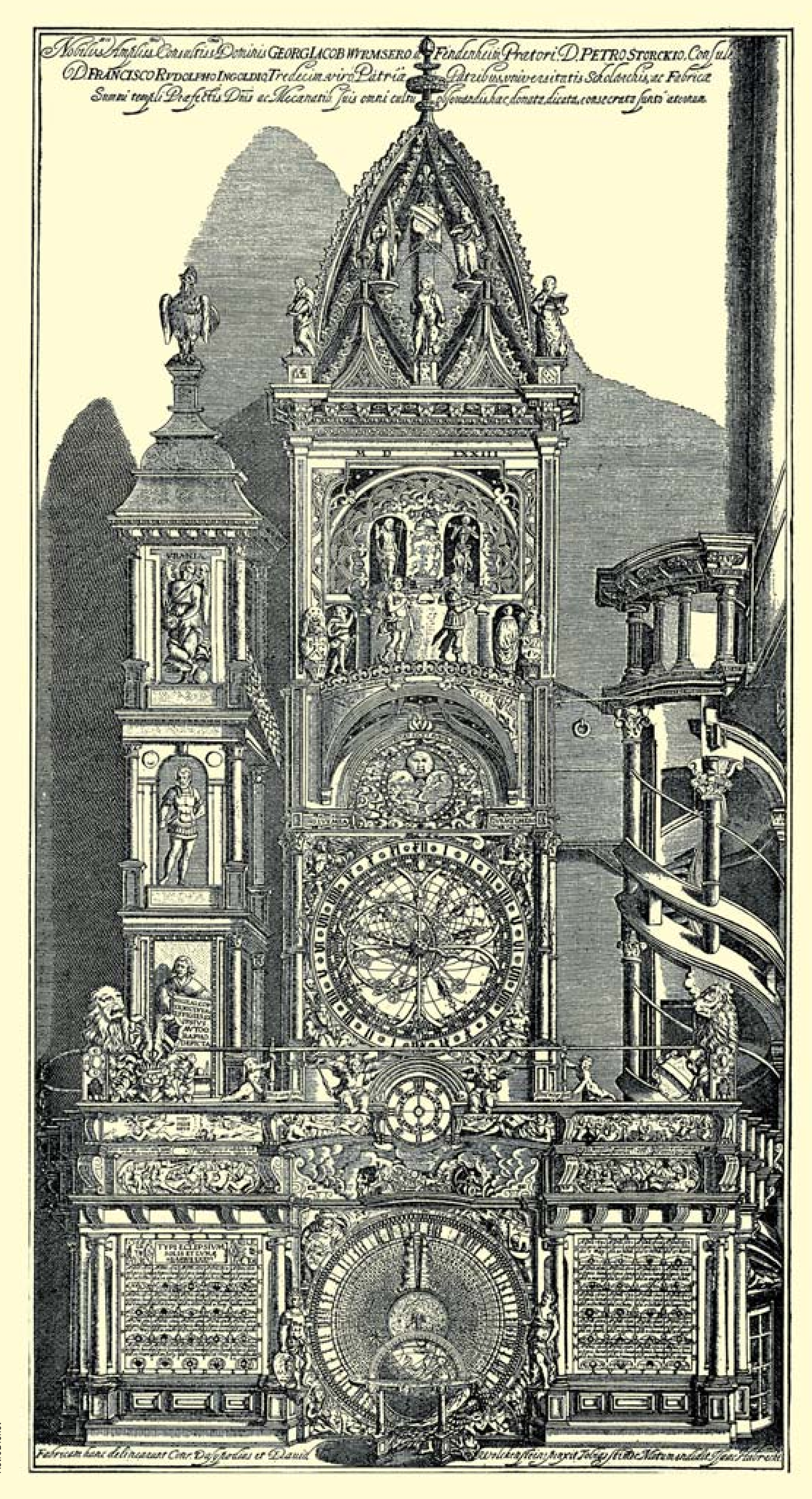
Birth trató de averiguar qué valor conceden al tiempo los naturales, para lo que exploró qué vínculos establecen entre tiempo y dinero. Al indagar en la población rural descubrió que los campesinos, cuyos días están gobernados por fenómenos naturales, como el amanecer, no reconocían frases como "el tiempo es oro", "presupuestar el tiempo" o "gestión del tiempo", a pesar de disponer de televisión por satélite y hallarse familiarizados con los usos occidentales. En cambio, los sastres de las mismas áreas sí tenían conciencia de tales nociones. Llegó así a la conclusión de que el trabajo asalariado influía en la percepción del tiempo de los sastres. De un modo más general, la asociación entre las nociones de tiempo y de dinero se encuentra adscrita al trabajo que realizamos y a las personas con las que trabajamos.

Ocurre a menudo que la forma cotidiana de habérselas con el tiempo nada tiene que ver con el concepto como entidad abstracta. Como postula Birth, se da con frecuencia una escisión entre la forma en que una cultura contempla la mitología del tiempo y la consideración que el tiempo recibe en la vida cotidiana.

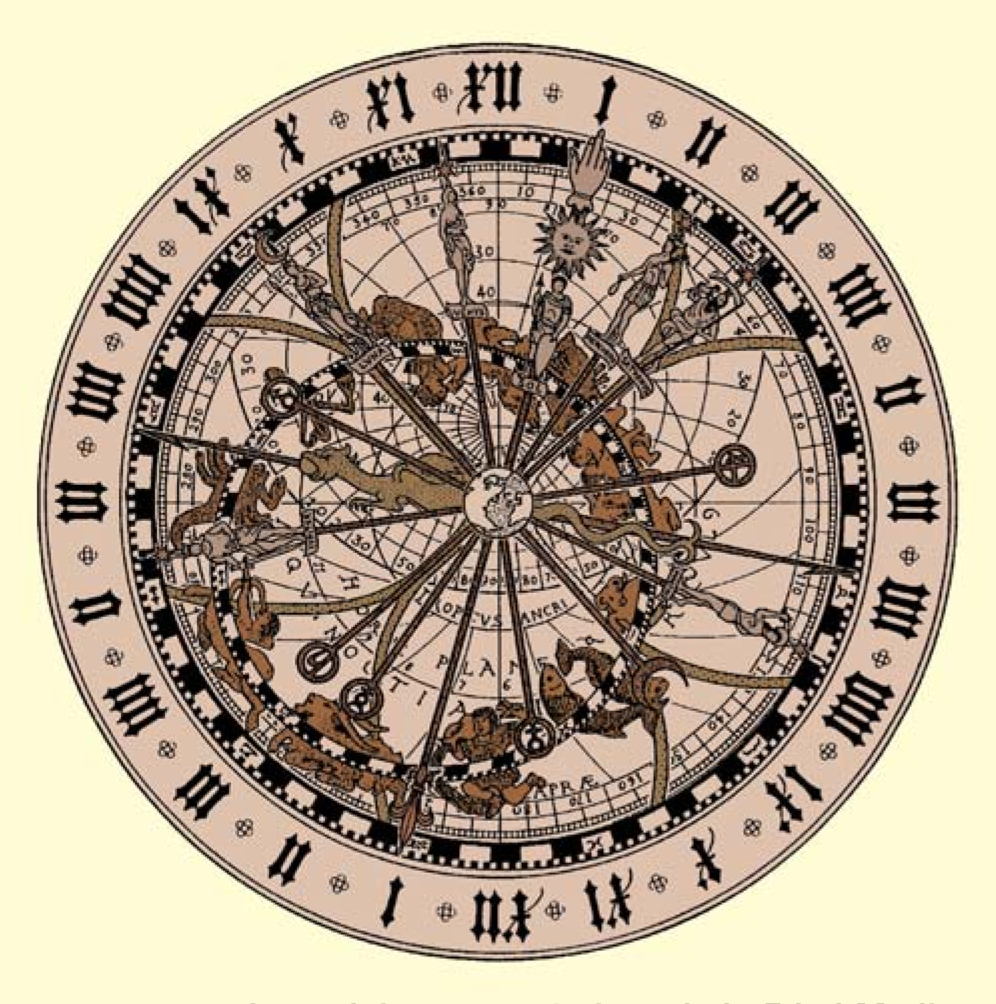
Ciertas culturas no distinguen con nitidez entre el pasado, el presente y el futuro. Los aborígenes australianos, por ejemplo, creen que sus antepasados salieron reptando de la tierra durante la Ensoñación y dieron existencia al mundo al imponer nombre, cantándolo, a cada accidente del terreno y a cada cosa viva. Incluso en nuestros días, una entidad no existe hasta que un aborigen la "canta".

Ziauddin Sardar, editor de la revista *Futures* y profesor de estudios poscoloniales en la Universidad Municipal de Londres, ha investigado el tiempo en las culturas islámicas, y en particular en la secta fundamentalista Wahba. Expone que los musulmanes llevan el pasado siempre consigo. El tiempo, en el Islam, es como un gran tapiz que integra al pasado, al presente y al futuro. El pasado está siempre presente.

Los seguidores del wahbaísmo, practicado en Arabia Saudí y también por Osama ben Laden, buscan recrear los días idílicos de la vida del profeta Mahoma. Han suprimido la dimensión mundana del futuro e idealizado una determinada visión del pasado. Todo cuanto hacen es tratar de reproducir dicho pasado. Pero Occidente ha "colonizado" el tiempo al difundir la expectativa de que la vida debería mejorar con el paso del tiempo. Y si se coloniza el tiempo, se coloniza también el futuro. Concebido el tiempo como una flecha, es obvio que el futuro indica progreso, en una sola dirección. Quizá cada pueblo pueda imaginar un futuro distinto.


GEORG IACOB WVRMSERO
D. PETRO STORCKIO
D. FRANCISCO RVDOLPHO INGOLDIO
VRANIA
Fabricam hanc delineavit Conr. Dasypodius et David

Tiempo y eternidad



Los relojes astronómicos de la Edad Media y del Renacimiento son obras maestras de la técnica y del arte al servicio de la edificación, y del entretenimiento, humanos

Günther Oestmann

AstroDienst

1. EL RELOJ ASTRONOMICO de la catedral de Estrasburgo (*a la izquierda, una vista general; a la derecha, la esfera*) reproducía el universo, pero también servía en el Medioevo como una atracción urbana.

Cuando se mira hoy la esfera de un reloj, se quiere, como mínimo, que dé la hora con precisión de minutos; para ello, carece de importancia cómo se defina astronómicamente la medición del tiempo, o qué tenga que ver con los movimientos celestes. Con los relojes astronómicos monumentales de la Edad Media pasa lo contrario: la información "normal" acerca de las horas y los minutos va acompañada de una gran cantidad de indicaciones astronómicas y astrológicas que sólo entienden unos pocos especialistas. Por eso siguen estos relojes ejerciendo, incluso en nuestra era tan tecnificada, una atracción especial, y son —tanto en Münster como en Praga o Estrasburgo, por poner sólo los ejemplos más famosos— importantes atracciones turísticas.

Hoy en día, muchos fieles que acuden a la catedral de Estrasburgo encuentran molesto el ir y venir de los turistas que se amontonan a mediodía delante del reloj. Pero ese trasiego profano coincide con la utilización de la seo en el pasado como lugar que merecía la pena ver y punto de encuentro. Desde la época en que el gobierno de la ciudad de Estrasburgo emprendió la construcción de la catedral, llevada a cabo bajo su propia dirección (hacia finales del siglo XIII), se consideró al edificio eclesiástico propiedad municipal.

En la reja del coro se publicaban las nuevas leyes y ordenanzas, y los miembros del concejo acudían a la catedral para discutir los problemas municipales. Allí se celebraban reuniones reglamentarias. Los albañiles sin trabajo utilizaban los espacios libres como lugar de encuentro para estipular contratos de trabajo con los constructores. Esto tenía lugar a menudo durante la celebración de la misa y no era infrecuente que se pidieran interrupciones del sermón o de los cánticos.

En el estrépito intenso se mezclaban el ladrar de los perros y el gruñir de los cerdos; la catedral se utilizaba como atajo para atravesar de un lado a otro. Delante del portal meridional se encontraba el mercado de los cerdos, de modo que, de vez en cuando, pasaban o los llevaban a través del templo. También se



tiene noticia de que las prostitutas ofrecían sus servicios durante la misa.

Igual que hoy, para las gentes de entonces el reloj astronómico de la catedral, que representaba una especie de modelo del universo, era en primer lugar una cosa digna de verse, que hacía más atractivo el punto de encuentro de la ciudad.

Autómatas de relojería en la Antigüedad y la Edad Media

La prehistoria de tales modelos del cosmos se remonta a la antigüedad. Han llegado hasta nosotros escasas noticias de la famosa esfera de Arquímedes, movida por energía hidráulica. Vitruvio describió hacia el año 22 a.C. mejoras y ajustes de clepsidras, que no sólo medían el tiempo sino que servían para mover figuras de autómatas y mostrar, mediante unos discos giratorios que llevaban representada la cúpula celeste en proyección estereográfica, el desplazamiento diario de las estrellas fijas.

Está documentada la existencia de numerosos relojes de agua monumentales, con autómatas, en el mundo árabe-islámico. Un importante papel tuvieron allí los escritos de algunos mecánicos de Alejandría (Ctesibio, Filón de Bizancio y Herón), que en el siglo IX fueron traducidos al árabe en Bagdad.

Pronto llegaron a Europa ejemplos de la avanzada técnica relojera de Oriente. En la *Vita* de Carlomagno, Einhardt da noticia de una pieza de este tipo, que trajo una embajada de Harun al-Rashid como regalo en el año 807: "También había allí un mecanismo de relojería hecho de latón, muy elaborado artísticamente, en el cual discurrían las doce horas movidas por un reloj de agua, con otras tantas bolitas de bronce que, con el correr de las horas, caían y hacían sonar un recipiente colocado debajo. Además de esto había doce jinetes, y al final de cada hora salían por doce ventanas, que, cerradas previamente, abrían con su movimiento; muchas cosas más se encontraban en este reloj, pero sería excesivamente largo enumerarlas".

Es probable que una combinación del conocimiento de los escritos de antiguos artífices de autómatas y de los modelos árabes ya construidos hiciera posible, a comienzos del siglo XIV, la construcción de grandes relojes. Entre 1322 y 1325 se construyó en la catedral de Norwich un reloj grande con esfera, carillón y una procesión de monjes. El reloj astronómico de Cambrai (1349) mostraba figuras móviles y un calendario. Entre 1352 y 1354 se construyó el primer reloj de la catedral de Estrasburgo, del cual se conserva aún el autómata de hierro, que representa un gallo. Mediante unas varillas transmisoras, alojadas en el interior de los tubos que formaban las patas, levantaba la cabeza, desplegaba las alas y emitía tres veces al día el canto del gallo, que un fuelle se encargaba de reproducir.

En el siglo XIV, los grandes relojes con indicaciones astronómicas, figuras de autómatas y carillones eran más abundantes que los simples relojes de torre con mecanismo de percusión. Aunque bien se podía leerlas en ellos, las horas eran secundarias. Como lugares más idóneos para ubicarlos se solían escoger las torres de los ayuntamientos, aunque también los edificios religiosos importantes ofrecían lugares para albergar estos mecanismos. Su instalación presuponía la existencia de grandes medios financieros, la disponibilidad de artesanos competentes y un constructor.

Hay constancia de la aparición, en el transcurso del siglo XV, de los primeros constructores especializados de relojes e instrumentos; a menudo, también de una directa colaboración entre sabios y artesanos.

Tres tipos de esferas

En general, se puede comprobar una disposición tripartita (disco de calendario, esfera astronómica, autómatas) en los relojes que se instalaban en espacios interiores. Aparecen tres variantes de la esfera astronómica en los relojes de los siglos XIV al XVI:

1) El limbo de la esfera se dividía en 24 horas; para reajustarla, se podía girarla. A continuación venía un disco con los doce signos del Zodíaco, así como un disco concéntrico del Sol y de la Luna, con una manecilla para cada astro. El disco lunar tenía un orificio circular para mostrar las fases de la Luna y una escala, sobre la cual, gracias a la manecilla solar, se leía el tiempo lunar. Junto a estas indicaciones, la esfera daba también el tiempo local y las posiciones del Sol y de la Luna en la eclíptica. Los relojes de este tipo se construyeron principalmente en Italia, en los siglos XV y XVI, aunque hay relojes astronómicos en Danzig y Rostock, así como algunos ejemplares ingleses (de Exeter, Wells, Hampton Court, etc.), que poseen también esferas con discos concéntricos.

2 y 3) Las otras dos variantes utilizaban la proyección estereográfica de la cúpula celeste sobre una superficie plana, aplicada ya por Hiparco y Tolomeo; venían en realidad a ser astrolabios de tamaño gigantesco movidos mecánicamente. Este instrumento estuvo muy extendido hasta el siglo XVI; servía sobre todo para medir el tiempo y para la enseñanza de la astronomía y la astrología. Existe aún, muy simplificado, en forma de carta estelar giratoria; consta de una lámina base que lleva grabados los trópicos, el ecuador celeste y las líneas de altitud y de acimut en proyección estereográfica. Por encima se hace girar la "araña", que exhibe, mediante proyección estereográfica, el círculo del Zodíaco y las posiciones de determinadas estrellas fijas. Para que se pueda ver la red de trazos de la lámina base, la araña está recortada a modo de trama, excepto en algunos puentes de unión.

Con este instrumento se puede resolver gran cantidad de problemas astronómicos, astrológicos, geodésicos (fijación del tiempo local, culminación de estrellas fijas, orto y ocaso solar, etc.) de manera mecánica. Mediante el giro de la araña se representa el movimiento diario de los astros en el cielo.

Con esto no se anda lejos de la utilización del reloj como sistema motor del astrolabio, para simular el movimiento diario del cielo. Vitruvio describió ya un me-

AstroDienst

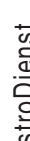
2. EN LOS TALLERES DE CONSTRUCCION de relojes trabajaban los artesanos de más talento de su tiempo.



3. LA ESFERA SUPERIOR del reloj de Cayetano muestra las posiciones de la Luna, el Sol y los nodos lunares en la eclíptica. De este modo se podían predecir con el reloj eclipses de Luna y de Sol.

canismo de ese tipo. En un recipiente con desagüe se impartía, por medio de un flotador, un movimiento de giro a un disco que llevaba inscrita una proyección estereográfica de la cúpula celeste; ese movimiento se efectuaba bajo una araña fija. La posición del Sol en la eclíptica se marcaba mediante una clavija, que se introducía en unos orificios perforados en el anillo de la eclíptica. Se han encontrado fragmentos de estos relojes, entre otros lugares, en Salzburgo y en los Vosgos.

En Bourges (1423) y en Chartres (1407) hay también híbridos de discos concéntricos y astrolabio. Entre 1571 y 1574 se construyeron para Lübeck, Münster y el segundo reloj de la catedral de Estrasburgo mecanismos que accionaban el movimiento medio de los planetas, aunque, por regla general, las esferas de los astrolabios estaban dotadas únicamente de dos manecillas para los movimientos medios del Sol y de la Luna, y de una tercera, en forma de dragón, para los nodos lunares.



Predicción de eclipses

Debido a que la órbita de la Luna forma un ángulo de unos cinco grados con la eclíptica, resultan dos puntos de intersección, o nodos. Recorren el cielo a lo largo de los signos del Zodíaco cada 18,5 años aproximadamente. Era importante saber, con fines astronómicos y astrológicos, su posición, ya que el comienzo de la Luna nueva y de la Luna llena en el nodo o cerca de él acarreaba eclipses de Sol o de Luna, a los que se consideraba portadores de desgracias. Si las manecillas del Sol y de la Luna coincidían con la de forma de dragón, se esperaba un eclipse de Sol; si el Sol se situaba sobre la cabeza del dragón y simultáneamente la Luna lo hacía sobre la cola (o al revés), tendría lugar un eclipse de Luna.

Pero, ¿cuál era la función de un reloj monumental en el espacio sacro? Los lugares de emplazamiento nos llevan a la conclusión de que este tipo de relojes adquirió una gran importancia en las iglesias. Algunas veces se utilizaba el coro para ubicarlos (así en Münster, Stralsund, Rostock, Wismar y Lübeck), de modo que el reloj se situaba a menudo justo detrás del altar mayor. Otras veces los relojes astronómicos se montaban en los cruceros, como en los casos de Danzig, Frankfurt del Meno, Osnabrück y Estrasburgo.

Un reloj astronómico con disco de calendario, esfera del astrolabio y autómatas representaba una curiosidad digna de verse. Era el producto más complicado de la industria humana que se pudiera imaginar. Nos parecerá raro que un mecanismo tal sólo fuera expuesto en la casa de Dios, pero correspondía a la utilización de la catedral como edificio público en la baja Edad Media, como se dijo antes al hablar de la catedral de Estrasburgo.

Además del gallo de hierro ya mencionado, hay también en la catedral de Estrasburgo otras figuras movidas mecánicamente, situadas a derecha e izquierda de la caja del órgano, en la nave principal, junto a la pared; son unas esculturas, de tamaño casi natural, de un pregonero municipal y de un barbudo con gorro, alzadas sobre repisas. Estas figuras se movían desde el pupitre del órgano mediante unos alambres, que el organista accionaba con los pedales; su música acompañaba los correspondientes movimientos de las estatuas.

Pentecostés se celebraba en Estrasburgo con numerosos festejos y procesiones, a los que acudían muchos lugareños de los alrededores; una de esas estatuas, a la que llamaban "Roraffe", saludaba con bufidos, burlas e insultos a estos fieles cuando ingresaban en el templo. Se conservan varias facturas de pagos hechos a monaguillos de la catedral para que se encargasen de los gritos. En los 21 artículos que el predicador de la catedral Geiler von Kaisersberg redactó en 1501 contra el concejo de Estrasburgo, se censuraba, además de las molestias que los asuntos municipales ocasionaban en la catedral durante la misa, el griterío blasfemo del "Roraffe". De todo ello se deduce que las figuras de autómatas tenían su papel en la catedral y gozaban de gran popularidad.

En las catedrales de Chartres, Laon, Reims y St. Denis se conservaban curiosidades: huevos de avestruz, costillas de ballena, cocodrilos disecados, dientes de

4. EL RELOJ DE LA FACHADA del ayuntamiento de Praga tiene encima de las esferas dos torrecitas, por las que discurre, cuando da las horas, una procesión de figuras.

narval (unicornio), garras de grifos, dientes de serpiente, meteoritos, jarros antiguos, camafeos y otras muchas cosas eran expuestas al público. Los relojes astronómicos, con sus autómatas, contaban también entre las "*mirabilia*" que atraían al pueblo y revalorizaban el edificio del templo.

No cabe duda de que el público observa la actuación de los autómatas con asombro. En una relación de viaje del siglo XVI se dice que del reloj de la catedral de Colonia "salían unas figuritas de los tres Reyes Magos, para maravilla de los niños y del pueblo".

En el año 1407 el capítulo de la catedral de Chartres hizo montar un reloj con el objetivo explícito de aumentar la autoridad de la Iglesia y atraer a la gente mediante obras espectaculares. Que los relojes monumentales fueran también un alarde representativo del poder y de la riqueza del donante justifica la leyenda que acompañaba a cada reloj famoso: que se cegaba

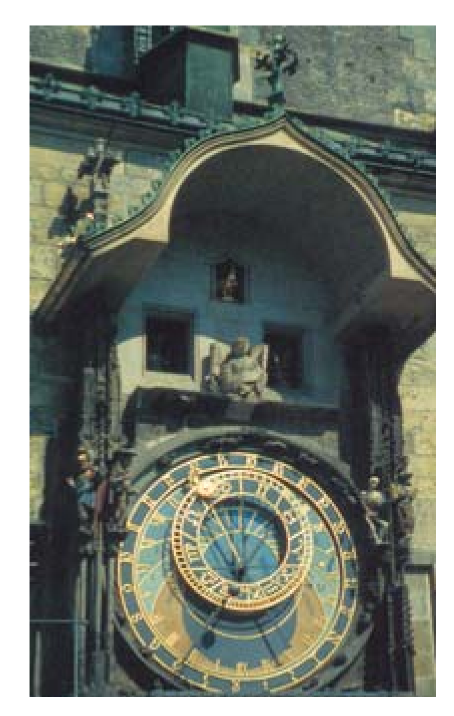


al artífice cuando acababa su obra para que no pudiese construir nada más maravilloso.

El reloj como imagen del universo

No es casualidad que fuera en la época de florecimiento de los relojes monumentales cuando se utilizase por vez primera la metáfora de los relojes: Nicolás Oresme tomó en 1377 la noción, acuñada por Lucrecio, de la "máquina del mundo" (*machina mundi)* y comparó el cosmos a un gigantesco reloj de ruedas que, puestas en movimiento por Dios, se engranaban según un plan predeterminado con exactitud.

La astrología constituye un elemento nada despreciable. Con la ayuda de la esfera de astrolabio se podía, por ejemplo, leer directamente el ascendente, el grado del Zodíaco en el horizonte en el momento del nacimiento y los límites de las 12 casas. El nuevo reloj de la catedral de Estrasburgo, acabado en 1574, se inspiró desde el principio en la astrología. Su constructor, Conrad Dasypodius (1531-1601), astrónomo y matemático, también trabajaba intensamente como astrólogo; era la regla, no la excepción, entre los sabios del siglo XVI. Redactó uno de los muchos comentarios al *Tetrabiblos* de Ptolomeo, la "Biblia de los astrólogos"; lo mandó a la imprenta en Basilea en 1578. Añadió un excurso sobre el reloj de Estrasburgo, donde presentaba lo fundamental de su concepción.



5. EL RELOJ DE PRAGA es, aún hoy en día, una de las atracciones principales para los turistas.

El tercer libro del *Tetrabiblos* comienza con una exposición acerca de la manera de conocer el ascendente. Allí se explican la medición del tiempo con los relojes de sol y de agua, el astrolabio y un método de cálculo para saber los ortos de los signos del Zodíaco. Ese texto fue la fuente en la que se inspiró Dasypodius. Juntó todos aquellos aparatos y procedimientos en el reloj de la catedral; instaló los solares afuera, y en lugar de las anticuadas clepsidras colocó autómatas y manecillas para la Luna y los planetas. El método de los ortos de los signos se materializa en un globo celeste movido mecánicamente. La intención del programa iconográfico que concibió para el reloj de la catedral de Estrasburgo y sus indicadores era "la descripción del tiempo", en palabras del propio Dasypodius. Esta declaración explica que, para el constructor del reloj de Estrasburgo, el tiempo era algo más que un continuo lineal, homogéneo, describible por medio de la posición de una aguja. El reloj, conforme a esta pretensión universal, reunía un compendio enciclopédico de representaciones del tiempo, que abarcaban tanto el tiempo lineal de la Salvación como las órbitas de la esfera de las estrellas fijas, el Sol, la Luna y los planetas, manifestadas gracias al astrolabio y el globo celeste.

Una nueva visión del tiempo

Esta conciencia del tiempo tendría que cambiar duraderamente con el desarrollo de la ciencia moderna en el siglo XVII: el cosmos mismo se convirtió en un mecanismo de relojería y el modelo abstraído del cielo, en un modelo de explicación de todos los procesos naturales. La función del reloj se redujo a la mera medición del tiempo una vez Christiaan Huyghens introdujo el péndulo como regulador del ritmo cronométrico. Robert Boyle (1627-1691) ve ya algo diferente de su constructor en el reloj de la catedral de Estrasburgo. Lo adoptó como analogía que reforzaba su propio punto de vista, a saber, que la existencia de Dios no se deja reconocer tanto por sus intervenciones eficaces cuanto por la estructura bien concebida y la medida regular del cosmos, construido como un mecanismo de relojería en el que todo discurre según el plan de su Creador.

Escribió Boyle: "Como en el reloj de Estrasburgo están dispuestas las piezas sueltas, que forman una máquina digna de admiración, en tan impresionante entramado, como están tan bien adaptadas y puestas en movimiento, de él cabe decir lo que sigue: a pesar de que sus numerosas ruedas y demás partes se mueven de maneras determinadas sin la menor huella de intelección ni de intención, cada una lleva a cabo su función, cumpliendo los distintos objetivos para los que fueron creadas, de manera regular y uniforme, como si tuvieran conocimiento de ello y procuraran cumplir con su deber.

"Y los diferentes movimientos de las ruedas actúan conjuntamente para representar los fenómenos que el artífice tenía en la mente, de manera tan exacta como si estuviesen animadas por un principio común que las llevara premeditadamente a tal colaboración. A un indio ignorante le parecerían más inteligentes que Conradus Dasypodius, quien ofreció su descripción. Con ella anunció al mundo que él era quien había proyectado esa maquinaria, él, que no podía dar las horas ni medir el tiempo tan a punto como ésta."

René Descartes conoció también el mecanismo de Estrasburgo; quizás el gallo mecánico le inspiró su consideración de los animales como autómatas sin alma.

En tiempos de la Ilustración no faltaron por doquier observaciones jocosas acerca de los enormes relojes y sus "teatros de marionetas". No se reparaban los mecanismos o padecían un mantenimiento deficiente. No había ya lugar para las interpretaciones simbólicas complejas, ni desde luego para el pensamiento astrológico, en una época que consideraba el tiempo sólo como accidente de la materia en movimiento, como un continuo lineal y neutro.

Josef Hegele



1. NUESTROS INSTRUMENTOS de medida del tiempo han ido ganando en complejidad en el transcurso de los milenios. Hemos pasado del cuadrante solar hemisférico de la Roma del siglo primero o segundo (*izquierda*) al reloj atómico por máser de hidrógeno introducido en los primeros años sesenta (*abajo, izquierda*), vía el reloj estadounidense de pared del siglo XVIII (*derecha*).

Crónica de la medición del tiempo

Nuestra concepción del tiempo depende de la manera en que lo midamos

William J. H. Andrewes



A lo largo de la historia, el empeño puesto en la medición del tiempo promovió el desarrollo científico y técnico. La necesidad de establecer divisiones del día y de la noche movió a egipcios, griegos y romanos a crear relojes de sol, de arena, clepsidras y otros instrumentos cronométricos. Aunque tales sistemas se adoptaron en Europa, la demanda de una medición fiable del tiempo, hacia el siglo XIII, instó la aparición del reloj mecánico. Pero la imprecisión e inseguridad de los primeros prototipos imposibilitaban las aplicaciones científicas, si bien resultaban satisfactorios para colmar las exigencias ordenadoras de monasterios y poblaciones. Hubo, pues, que esperar el advenimiento del péndulo como regulador de su funcionamiento. Los relojes de precisión que a partir de entonces se desarrollaron resolvieron un problema crítico en la historia del progreso de la humanidad: la determinación de la posición de un barco en mar abierto. Gracias a ello, su aportación a la revolución industrial exime de toda ponderación.

Hoy día, la mayoría de nuestros aparatos electrónicos se rigen por los latidos de un instrumento cronométrico de alta precisión. Los ordenadores contienen un reloj de cristal de cuarzo que regula su funcionamiento. Desde los satélites del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) se envían señales que no solamente calibran las funciones de certeros equipos de navegación, sino también las de teléfonos celulares, sistemas de transacciones bursátiles instantáneas y redes de distribución de energía de ámbito nacional. La integración en nuestra vida cotidiana de estas técnicas de cronometría ha llegado a ser tan íntima, que sólo cuando fallan caemos en la cuenta de nuestro grado de dependencia.

Primeros pasos

Expone la arqueología que los babilonios y los egipcios comenzaron a medir el tiempo hace al menos 5000 años. Elaboraron calendarios para organizar y coordinar actividades comunales y acontecimientos públicos, plani-

MUSEO NACIONAL DEL TIEMPO (*arriba*); CORTESIA DEL MUSEO DEL TIEMPO, ROCKFORD, ILL.; FOTOGRAFIA DE DIRK FLETCHER (*abajo*)

ficar los embarques de mercancías y, en particular, regular siembras y cosechas. Sus calendarios se basaban en tres ciclos naturales: el día solar, marcado por los sucesivos períodos de luz y oscuridad a que da lugar la rotación de la Tierra sobre su eje; el mes lunar, señalado por las fases de la Luna en su órbita de la Tierra, y el año solar, definido por el cambio estacional que produce el giro de nuestro planeta en torno al Sol.

Antes de inventarse la luz artificial, la Luna desempeñaba un papel dominante. Sobre todo para quienes habitaban cerca del ecuador, sus fases eran más perceptibles que el paso de una estación a otra. De ahí que los calendarios concebidos en latitudes bajas respondieran más al ciclo lunar que al ciclo solar. Sin embargo, en climas septentrionales, donde las estaciones condicionaban la agricultura, el año solar adquirió una importancia mayor. A medida que el Imperio Romano se extendía hacia el norte, su calendario tomaba el año solar como centro. El calendario gregoriano actual tiene su base en los de Babilonia, Egipto, Israel y Roma.

El calendario civil egipcio constaba de doce meses de 30 días, con 5 días añadidos para aproximarse al año solar. Cada período de 10 días estaba marcado por la aparición de grupos especiales de estrellas (constelaciones), grupo decán. Al aparecer la estrella Sirio, justo antes del amanecer, lo cual sucedía durante la acostumbrada crecida anual del Nilo, podían verse 12 de esos grupos decán a través de los cielos. El significado cósmico que daban los egipcios a esa docena les hizo crear un sistema en el que cada intervalo de oscuridad (y después cada intervalo de luz) se dividía en 12 partes iguales. Estos períodos se denominaron horas temporales, porque su duración variaba al alargarse y acortarse los días y las noches según la estación del año. Las horas diurnas eran largas en verano y cortas en invierno. Sólo en los equinoccios de primavera y otoño se igualaban las horas de luz y de oscuridad. Las horas temporales, que los griegos y después los romanos adoptaron y difundieron por toda Europa, se mantuvieron en uso durante más de 2500 años.

La invención del reloj solar permitió indicar la hora temporal durante el día por medio de la longitud o la dirección de la sombra producida por el sol. Para señalar las horas nocturnas se ideó el reloj de agua o clepsidra. En su origen la clepsidra consistía en un recipiente cerca de cuya base se había perforado un pequeño orificio, por donde salía el agua. A medida que el nivel de agua iba descendiendo, se iban leyendo las horas transcurridas de acuerdo con lo señalado en las marcas de la pared interior del recipiente. Aunque estos dispositivos funcionaron satisfactoriamente en la cuenca mediterránea, no eran muy de fiar con los cielos nublados y las frecuentes heladas del norte de Europa.

CORBIS

El pulso del tiempo

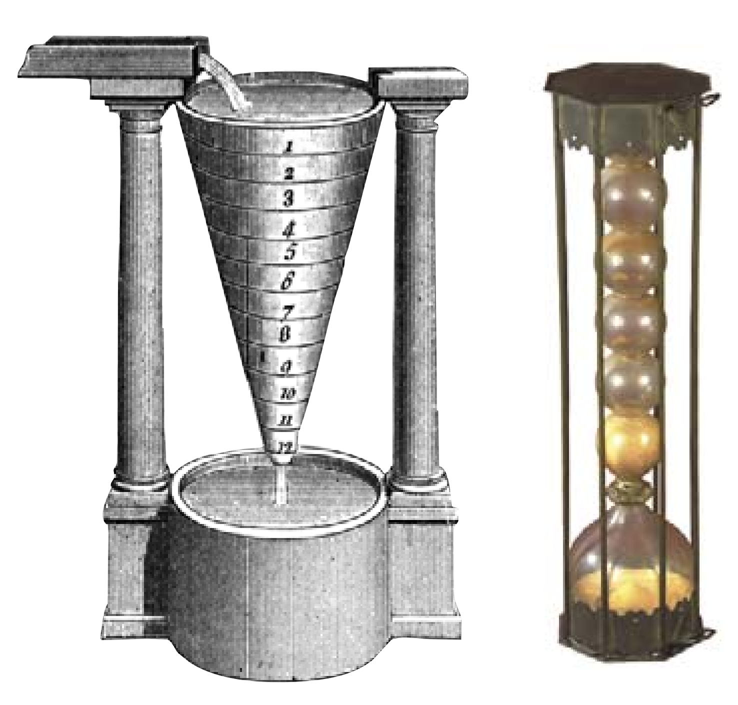
El primer testimonio escrito de un reloj mecánico accionado por pesas data de 1283. Procede de la abadía inglesa de Dunstable, en Bedfordshire. No debe extrañar que la Iglesia desempeñara un papel destacado en la invención y desarrollo de la técnica horológica. La estricta observancia de las horas de oración en conventos y monasterios reclamaba un instrumento capaz de medir el tiempo con mayor precisión. Por otra parte, la Iglesia no sólo controlaba la educación sino que poseía también conocimientos y medios para emplear los artesanos más hábiles. Además, el crecimiento de la población mercantil urbana en Europa durante la segunda mitad del siglo XIII creó la necesidad de una medición del tiempo más exacta. Hacia el 1300, había artesanos especializados en la construcción de relojes para las iglesias y catedrales de Francia e Italia. De entonces arranca la costumbre de que el tañido de las campanas de la iglesia indique las horas.

La gran innovación de este reloj no consistía en la pesa descendente que le daba fuerza motriz, ni en las ruedas engranadas que transferían la potencia (utilizadas ya 1300 años atrás), sino en el escape. Este mecanismo controlaba la rotación de la rueda y transmitía la potencia necesaria para mantener el movimiento del balancín, que regulaba el ritmo de avance del reloj. Se desconoce quién fue el inventor del mecanismo de escape.

Horas uniformes

Aunque el reloj mecánico pudiera ajustarse para marcar horas temporales, por su propia naturaleza tendía a marcarlas iguales. Pero entonces se planteaba la cuestión de cuándo iniciar el cómputo horario. Desde comienzos del siglo XIV fueron apareciendo varios sistemas. Los basados en dividir el día en 24 partes iguales se diferenciaban por el punto de arranque. Las horas italianas empezaban en el ocaso solar, las babilónicas en el orto, las horas astronómicas a mediodía y, a media noche, las del “reloj grande” (utilizadas en algunos relojes de torre de Alemania). Con el tiempo, estos y otros sistemas competidores fueron reemplazados por los de horas francesas (“de reloj pequeño”), que fraccionaban el día en dos períodos de 12 horas a partir de la medianoche, como hacemos ahora.

Desde 1580 se venían exigiendo relojes capaces de señalar minutos y segundos. Tal precisión de los mecanismos no se logró hasta la década de 1660, cuando se inventó el reloj de péndulo. Los minutos y segundos



2. LOS MATERIALES FLUIDOS se han utilizado a menudo para medir el tiempo. Conforme el agua sale gota a gota de una clepsidra (*izquierda*), su nivel en el recipiente desciende y va pasando por marcas que señalan las horas transcurridas. Los relojes de arena, como este ejemplo francés del siglo XVIII (*derecha*) que divide la hora en intervalos de 10 minutos, medían períodos de tiempo determinados.

CORBIS (*izquierda*); CORTESIA DEL MUSEO DEL TIEMPO, ROCKFORD, ILL. (*derecha*)

proceden de la división sexagesimal del grado introducida por los astrónomos de Babilonia. La palabra "minuto" tiene su origen en el latín *prima minuta*, la primera división pequeña; "segundo" viene de *secunda minuta*, la segunda división pequeña. El fraccionamiento del día en 24 horas y el de las horas y minutos en 60 partes arraigó de tal manera en la cultura occidental, que resultaron vanos todos los esfuerzos por modificar esa estructura. Como ocurrió con el empeño de la Revolución Francesa, en las postrimerías del siglo XVIII, cuando el gobierno adoptó el sistema decimal. Aunque entonces se introdujera con éxito el metro, el litro y otras unidades de base 10, la propuesta división del día en 10 horas de 100 minutos, y cada minuto en 100 segundos, perduró sólo 16 meses.

Relojes portátiles

Tras la invención del reloj mecánico, el tañido periódico de la campana de la iglesia o del reloj de la torre bastaba para regular la actividad diaria de la población. Desde el siglo XV aumentó de un modo significativo la demanda de relojes para uso doméstico. Quienes podían permitirse ese lujo querían, además, poderlo llevar de un sitio a otro. Se consiguieron prototipos portátiles sustituyendo la pesa por un muelle o resorte helicoidal. Sin embargo, la tensión del muelle varía y es máxima cuando está totalmente enrollado (tiene toda la cuerda dada). Para superar este problema un desconocido genio de la mecánica inventó entre 1400 y 1450 el caracol, así llamado por su especial forma cónica. Este dispositivo se conecta a través de un cordón al barrilete, donde se aloja el muelle. Cuando se ha dado toda la cuerda al reloj, tirando del cordón desde el barrilete al caracol, la disminución del diámetro de la espiral de cono viene compensada por la mayor tensión del muelle. Así, el caracol iguala la fuerza ejercida por el muelle sobre las ruedas del reloj.

La importancia del caracol no debe subestimarse. Posibilitó el desarrollo del reloj portátil y su evolución posterior en los modelos de bolsillo. Numerosos relojes de calidad accionados por muelle, como los cronómetros navales, siguieron incorporando este elemento hasta después de la Segunda Guerra Mundial.

Péndulos

En el siglo XVI, el astrónomo danés Tycho Brahe y otros se propusieron aplicar los relojes a fines científicos. Sin embargo, ni los más perfeccionados todavía distaban de haber adquirido la fiabilidad suficiente. En particular, los astrónomos necesitaban un instrumento de mejor calidad para medir los tiempos de tránsito de las estrellas y crear así mapas celestes más exactos. El péndulo demostró ser la clave de la precisión y la seguridad. Galileo Galilei, y otros que le precedieron, experimentaron con péndulos, pero fue Christiaan Huygens quien construyera el primer reloj de péndulo en las Navidades de 1656. Huygens reconoció inmediatamente el valor comercial y científico de su invento. Seis meses más tarde se concedía a un fabricante de La Haya licencia para fabricar relojes de péndulo.

Huygens advirtió que un péndulo que describía un arco circular completaba las oscilaciones pequeñas más deprisa que las grandes. Por consiguiente, cualquier variación del recorrido de oscilación del péndulo producía un adelanto o un retraso del reloj. Sabedor de que era imposible mantener constante la amplitud (extensión de recorrido) en las sucesivas oscilaciones, el físico holandés ideó una suspensión del péndulo tal, que la lenteja se moviera siguiendo un arco cicloidal, no un arco circular. De esta forma, el péndulo oscilaba en el mismo tiempo cualquiera que fuese la amplitud del movimiento. La precisión de los relojes de péndulo centuplica la alcanzada por sus predecesores, reduciendo a un minuto por semana variaciones que solían ser de 15 minutos diarios. Las noticias de la invención se difundieron con rapidez. Hacia 1660, franceses e ingleses creaban ya sus propias versiones de esta nueva máquina de relojería.

El autor

WILLIAM J. H. ANDREWES, antiguo conservador en la Universidad de Harvard, asesora a distintas instituciones museísticas en la historia de la medición del tiempo.

La aparición del péndulo no sólo incrementó la demanda de relojes, sino que dio también lugar a su integración en el mobiliario doméstico. Pronto comenzaron a definirse estilos nacionales: los fabricantes ingleses diseñaron cajas que se acomodaran al movimiento del reloj, mientras que los franceses se interesaban más por la forma y decoración. A Huygens, sin embargo, le importaban muy poco las apariencias, dedicando gran parte de su tiempo a perfeccionar el dispositivo para uso en astronomía y a resolver el problema de determinar la longitud de un navío en alta mar.

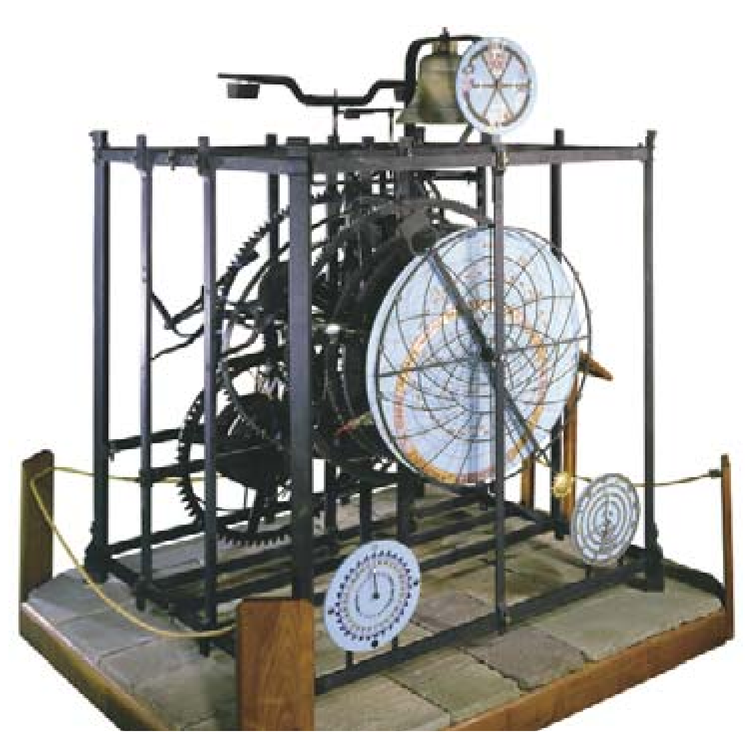
Innovaciones

En 1675 Huygens se anotó otro hallazgo importante, el volante con muelle en espiral. Así como la gravedad controla el balanceo oscilante del péndulo en los relojes de armario, este muelle regula la oscilación giratoria de una rueda volante en los portátiles. El volante es un disco finamente equilibrado, que gira por completo en un sentido y después en el otro, repitiendo el ciclo una y otra vez. El muelle regulador en espiral revolucionó la precisión, consiguiendo mantenerla dentro de un minuto diario. Merced a ello, disparó el mercado de los relojes, que ya no se llevaban colgados en una cadena al cuello, sino en el bolsillo como un complemento indumentario más.

Por entonces, a oídos de Huygens llegó la noticia de una importante invención inglesa: el escape de áncora. A diferencia del escape de árbol, que nuestro holandés había empleado en sus relojes de péndulo, este nuevo tipo de escape permitía que el péndulo oscilara en un arco tan pequeño, que hacia innecesaria la trayectoria cicloidal. Además, gracias al escape de áncora pudieron introducirse péndulos largos, aunque comprimidos, que se movía a una oscilación por segundo. Ello condujo al desarrollo de nuevos tipos de cajas. El reloj de caja larga o de pared —llamado en Estados Unidos, desde 1876, reloj del abuelo, debido a una canción popular— comenzó a imponerse entre los estilos ingleses. Estos relojes, provistos de péndulo largo y escape de áncora, mantienen la precisión dentro de un margen de pocos segundos a la semana. Thomas Tompion, famoso relojero inglés, y su sucesor, George Graham, modificaron más tarde el escape de áncora para que pudiera funcionar sin retroceso. Este diseño mejorado se convertiría, a lo largo de los 150 años siguientes, en el tipo más generalizado en la medida de precisión del tiempo.



4. RELOJ MECANICO accionado por resorte, construido por Salomon Coster en 1657. Este relojero holandés colaboró con Christiaan Huygens, introductor del péndulo en los relojes mecánicos.



3. RELOJ MECANICO encargado por Richard de Wallingford, matemático inglés y abad de St. Albans. Se construyó entre 1327 y 1336 para ayudar a sus monjes en el cumplimiento de sus tareas diarias.

CORTESIA DEL MUSEO DEL TIEMPO, ROCKFORD, ILL. (*arriba y abajo*)

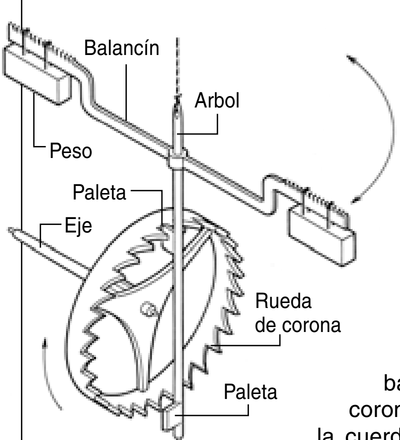
Longitud

Cuando se fundó el Real Observatorio de Greenwich en 1675, sus estatutos establecían, entre sus funciones, la “determinación de la tan deseada longitud de los lugares”. El primer Astrónomo Real, John Flamsteed, utilizó relojes con escape de áncora para medir el preciso instante en que las estrellas cruzaban el meridiano celeste, esto es, la línea imaginaria que une los polos de la esfera celeste y define el rumbo

DESARROLLO DE LOS PRIMEROS RELOJES MECANICOS

1 *Escape de árbol y balancín*

El elemento innovador de los primeros relojes mecánicos fue el escape, mecanismo que a la vez controlaba la rotación de la corona y transmitía la potencia necesaria para mantener la oscilación del balancín; éste a su vez regulaba la velocidad a la que funcionaba el reloj. (Ocurría ello alrededor del 1300.) La corona con dientes de sierra está movida por un tren de engranajes accionado por un peso suspendido de una cuerda enrollada en el eje. La rotación dextrógira de la corona se ve obstruida por dos paletas que sobresalen de un eje vertical (el árbol) solidario con una barra llamada balancín. Cuando la paleta superior detiene el giro de la corona (produciendo un "tic"), el diente trabado de la rueda empuja progresivamente la paleta hacia atrás hasta que ésta se queda libre y escapa. Sin embargo, el giro de la rueda vuelve a detenerse casi inmediatamente, porque la paleta inferior se traba con otro diente (que hace un "tac") y empuja luego el árbol en el sentido opuesto. Se produce así una oscilación atrás y adelante del árbol y el balancín gobernada por la corona, que continúa hasta que la cuerda se desenrolla por completo. La cadencia de operación del mecanismo puede ajustarse desplazando los pesos situados en los brazos del balancín hacia fuera (para retrasar) o hacia dentro (para adelantar).



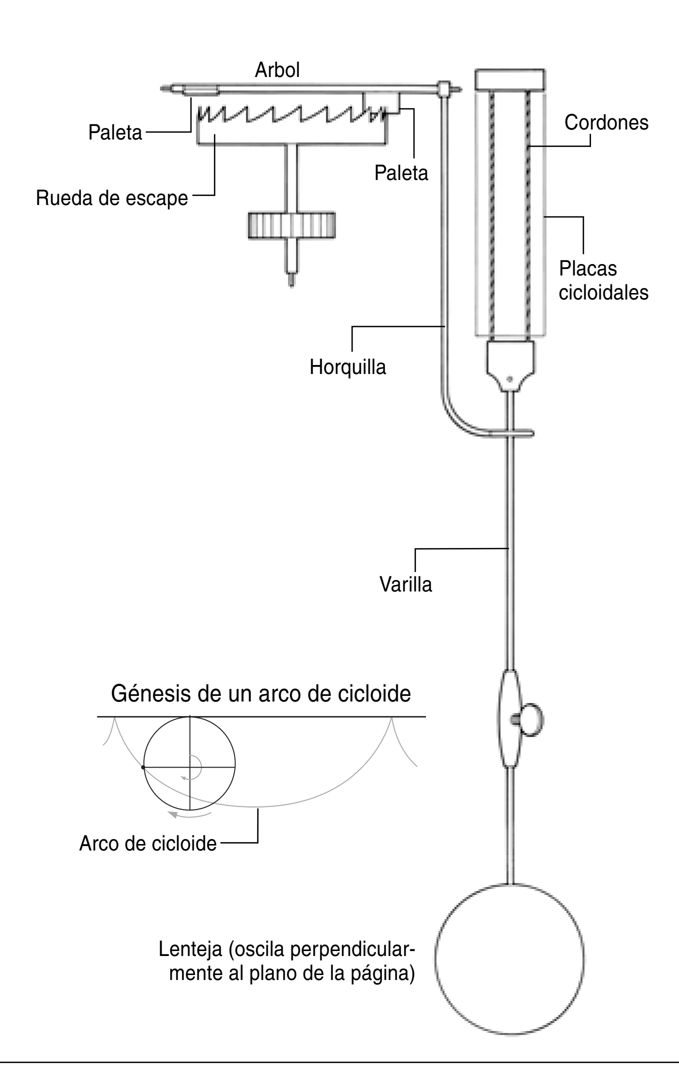
2 *Caracol*

El uso de resortes enrollados en hélice como fuerza motriz de los relojes se llevó a la práctica con la invención del caracol en la primera mitad del siglo XV. Aunque el resorte sea una fuente de energía compacta, su fuerza varía, siendo mayor cuanto más apretadamente está enrollado. Se ideó el caracol, una pieza cónica con estrías, para compensar la tensión variable que ejerce el muelle principal del reloj. El barrilete donde se aloja el muelle está unido al caracol por un cordón o cadena. Cuando el muelle principal está enteramente tensado, el cordón tira del extremo estrecho del caracol, donde el brazo del par es mínimo. A medida que marcha el reloj, el cordón va regresando del caracol al barrilete. Para compensar la relajación de la tensión del muelle principal, la espiral que describe el cordón sobre el caracol va aumentando de diámetro. La fuerza entregada a los engranajes del reloj permanece así constante, a pesar de cambiar la tensión del muelle principal.

Muelle principal
Barrilete
Caracol
Cordón

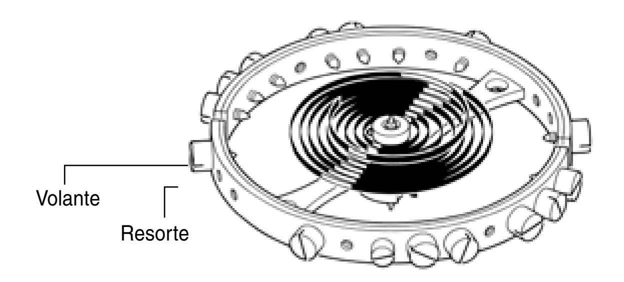
3 *Reloj de péndulo*

Aunque Galileo Galilei y otros científicos del siglo XVI conocieran las posibilidades del péndulo como instrumento de medición del tiempo, fue Christiaan Huygens el primero que concibió un reloj de péndulo. Huygens no tardó en advertir que si un péndulo describe un arco pequeño oscilará más deprisa que otro cuyo recorrido sea mayor. Para superar este problema instaló dos "carrillos cicloidales" curvos (*en vista lateral*) en el punto de suspensión del péndulo. Al actuar sobre los cordones de suspensión, esas curvas reducían la longitud efectiva del péndulo a medida que aumentaba su arco, de forma que describa una cicloide en vez de una circunferencia (*abajo*). En teoría el péndulo completaba así cada oscilación en el mismo período de tiempo, fuese cual fuese su amplitud de balanceo. En el reloj de Huygens, el movimiento del péndulo bajo el influjo de la gravedad sustituye a la oscilación del balancín horizontal, de gobierno puramente mecánico. Ahora es el batir del péndulo el que regula la operación del escape de árbol y la rotación de las ruedas, que a su vez entregan una medida del tiempo mucho más fiable y segura a las manecillas de la esfera.



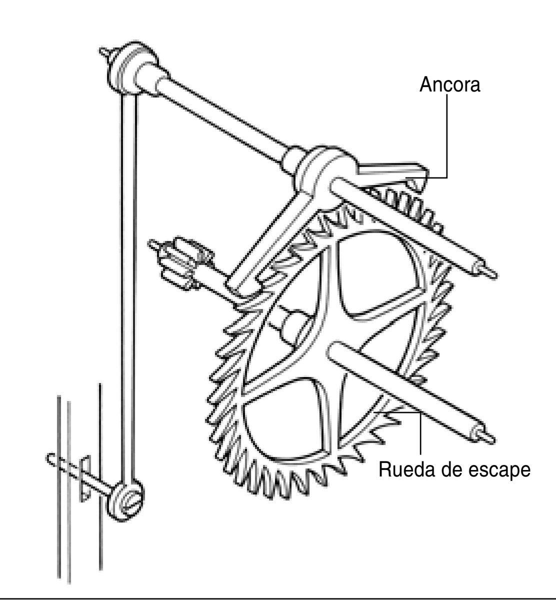
Volante con muelle en espiral

En 1675 Huygens inventó el volante con muelle en espiral. Así como la gravedad controla la amplitud de la oscilación del péndulo de un reloj, este resorte regula la oscilación rotatoria de una rueda volante en los relojes portátiles. El volante es un rotor que gira en un sentido y después en otro, repitiendo el ciclo una y otra vez. Se ilustra aquí una versión moderna de volante, con tornillos giratorios ajustables para lograr un excelente equilibrio.



5 Escape de áncora

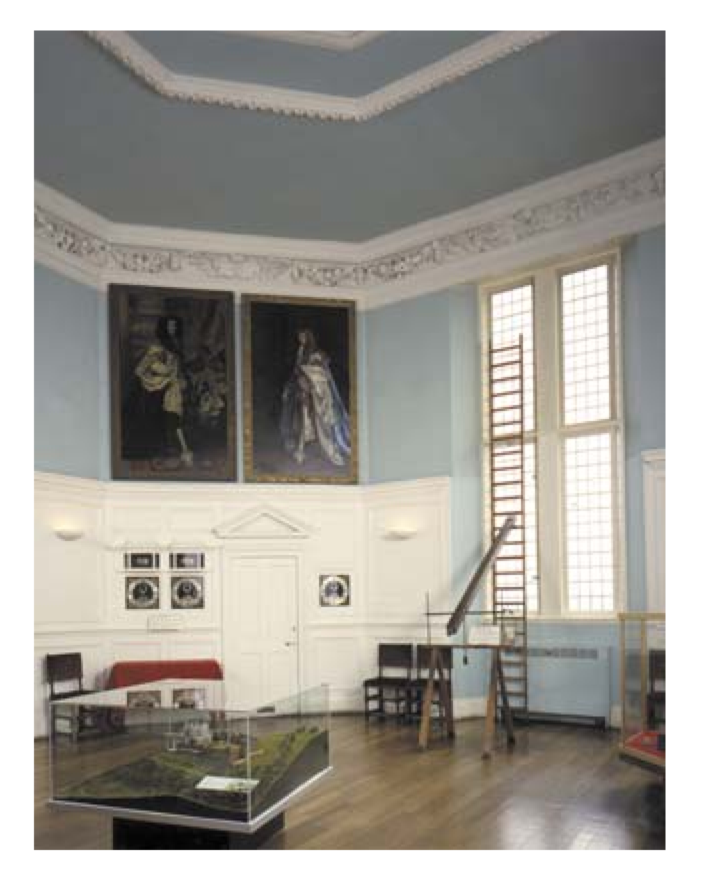
Desarrollado hacia 1670 en Inglaterra, el escape de áncora es un dispositivo de tipo palanca, que en la forma se asemeja al ancla (o áncora) de un buque. El vaivén de un péndulo mece el áncora de tal manera que traba y después destraba cada uno de los dientes de la rueda de escape, lo que a su vez permite que la rueda gire un ángulo preciso. A diferencia del escape de árbol utilizado en los primeros relojes de péndulo, el escape de áncora deja que el péndulo recorra un arco pequeño, que haga innecesario seguir una trayectoria de oscilación cicloidal. Además, esta invención posibilitó el empleo un péndulo largo, que bate segundos, lo que condujo a un nuevo diseño: el reloj de pared o caja larga.



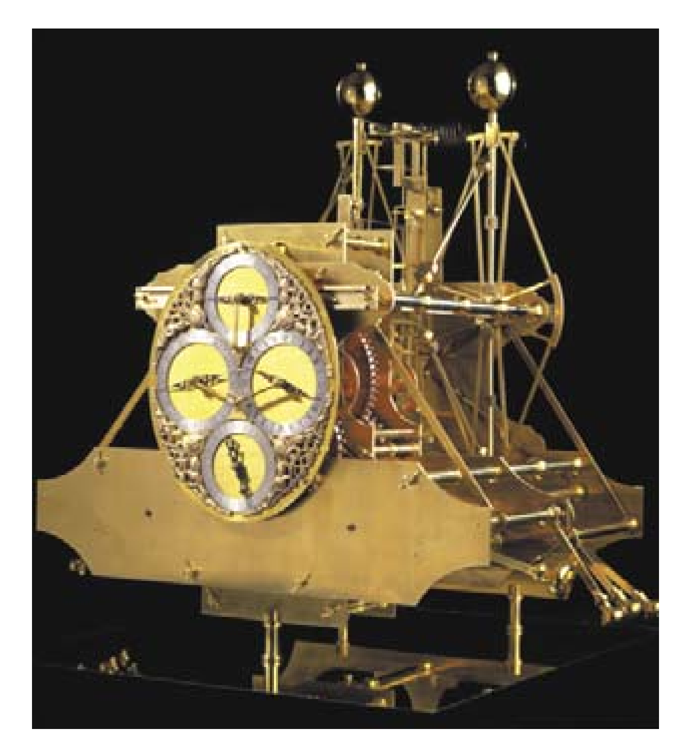
DAVID PENNEY (*dibujos*); MUSEO NACIONAL MARITIMO, LONDRES (*fotografía*)

sur sobre el cielo nocturno. Obtuvo información sobre las posiciones de los astros mucho más precisa que la alcanzable con las mediciones angulares realizadas hasta entonces mediante sextantes o cuadrantes.

Los navegantes hallaban su latitud (posición al norte o al sur del ecuador) midiendo la altura del Sol o la estrella polar. No existía, sin embargo, una referencia tan sencilla para determinar la longitud. Los pilotos anotaban con esmero distancias y direcciones, pero muchas veces sus esfuerzos se veían obstaculizados por tempestades y corrientes. Los errores de navegación resultantes costaban muy caros a los países que sostenían el tráfico marítimo, no sólo por la indebida prolongación de los viajes, sino, sobre todo, por la pérdida de vidas humanas, naves y mercancías. La gravedad de esta situación afectó al propio gobierno británico en 1707, cuando un almirante y 1600 marineros de la flota perecieron en el naufragio de cuatro navíos de la Armada Real en la costa de las islas Scilly. Por ello, un decreto de 1714 del Parlamento británico ofrecía elevados premios a quien descubriera soluciones prácticas para determinar la longitud en que se encontraba un navío. La recompensa más elevada, 20.000 libras (que equivaldrían hoy a unos 18 millones de euros), se otorgaría al inventor de



5. SALA DEL OBSERVATORIO REAL DE GREENWICH. En dicho centro se instalaron relojes equipados con escape de áncora en 1675 para cronometrar los movimientos de las estrellas con mayor exactitud de lo que antes había sido posible. El perfeccionamiento de los mapas astronómicos revistió una importancia decisiva para la seguridad en la navegación marítima.



6. EL RELOJ NAVAL H1 DE JOHN HARRISON se ganó un lugar en la historia en 1736, cuando demostró ser capaz de determinar la longitud en su viaje de prueba. Esta réplica del invento del carpintero inglés fue construida en 1984.

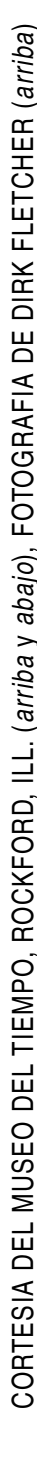
un instrumento que fuese capaz de hallar con precisión superior a medio grado, o 30 millas náuticas, la longitud a que se encuentra un buque al arribar a un puerto de las Indias Occidentales, cuya longitud podía determinarse mediante métodos comprobados de mediciones en tierra firme.

Esta gran recompensa atrajo una avalancha de propuestas insensatas. De ahí que la Junta de Longitud, comisión creada para revisar las ideas prometedoras, no se reuniera durante más de 20 años. Se conocían, no obstante, desde tiempo atrás dos soluciones teóricamente sólidas. La primera, el método de la distancia lunar, exigía observaciones exactas de la posición de la Luna con relación a las estrellas; a partir de ahí se determinaba el tiempo de un punto de referencia, de donde se calculaba la longitud. La otra solución requería un reloj muy preciso para efectuar idéntica determinación. Como la Tierra completa una rotación cada 24 horas —15 grados en una hora—, una diferencia en tiempo de dos horas representa 30 grados en longitud. Los obstáculos en apariencia insalvables para medir con exactitud el tiempo en el mar —entre ellos los frecuentes vaivenes de los barcos, los extremados cambios de temperatura y las variaciones de la gravedad en las diferentes latitudes— convencieron a Isaac Newton y sus seguidores de que el método de la distancia lunar, aun siendo problemático, constituía la única solución viable.

Con todo, Newton se equivocaba. En 1737 la Junta se reunió por vez primera para examinar la propuesta de un candidato inesperado, un carpintero de Yorkshire que respondía al nombre de John Harrison. El reloj de longitud de Harrison, un verdadero armatoste, se había utilizado en un viaje a Lisboa y había demostrado su valor en la travesía de regreso al corregir en 68 millas la marcación de la longitud del buque obtenida por el piloto del navío. Su creador no quedó, sin embargo, satisfecho. En vez de pedir a la Junta una nueva comprobación de su reloj en las Indias Occidentales, solicitó y recibió ayuda financiera para construir una nueva versión mejorada. Al cabo de dos años de trabajo, tampoco le gustó su segundo modelo y emprendió un tercero, en el que trabajó 19 años. Cuando ya estaba listo para pruebas, se dio cuenta de que era mejor su cuarto cronómetro naval, un reloj de 13 centímetros de diámetro que había desarrollado simultáneamente. En un viaje a Jamaica en 1761, el reloj de Harrison funcionó suficientemente bien para ganar el premio, pero la Junta se negó a concedérselo sin nuevas pruebas. Un segundo ensayo en 1764 confirmó su éxito. La Junta mandó concederle 10.000 libras. Tuvo que intervenir el rey Jorge III en 1773 para que percibiera el dinero restante. Pero el trabajo de Harrison inspiró desarrollos sucesivos. En 1790 el cronómetro naval estaba ya tan perfeccionado, que nunca hubo que modificar su diseño fundamental.



7. RELOJ DE SOBREMESA, con su revolucionaria maquinaria de madera, desarrollado por Eli Terry. Las ingeniosas técnicas de producción en serie de este artesano del siglo XIX permitieron fabricar relojes a precios asequibles.



Producción en serie

Al iniciarse el siglo XIX los relojes habían alcanzado una precisión razonable, aunque seguían siendo caros. Comprendiendo la aceptación que tendría un reloj de bajo coste, dos inversores estadounidenses contrataron con Eli Terry, relojero de Plymouth (Connecticut), la fabricación de 4000 mecanismos de madera para relojes de pared en 1807. Gracias a un generoso anticipo, Terry pudo dedicar el primer año a fabricar el utillaje necesario para la producción en serie. Fabricando piezas intercambiables consiguió completar su trabajo según los términos del contrato.

Algunos años después, aplicando las mismas técnicas de producción en serie, Terry concibió un reloj de sobremesa con mecanismo de madera. A diferencia del reloj de pared, que exigía comprar la caja por separado, el reloj de sobremesa de Terry era un conjunto integrado. Sólo había que darle cuerda y colocarlo sobre la mesa o la repisa. Muchas personas de clase media podían gastarse la modesta cantidad de 15 dólares en un reloj. Así empezó la iba a ser la afamada industria relojera de Connecticut.

Patrón horario

Antes de la expansión de los ferrocarriles en el siglo XIX, las ciudades de EE.UU. y Europa ajustaban al Sol su hora local. Si en una ciudad el punto más alto del paso del Sol ocurría tres minutos antes que en otra, el mediodía en dicha ciudad se marcaba también tres minutos antes. Era obvio que la incipiente red del ferrocarril necesitaba tener una misma hora normalizada en todas las estaciones del trayecto; para satisfacer esa exigencia, los observatorios astronómicos empezaron a distribuir por telégrafo la hora exacta a las compañías ferroviarias. Y así, el primer servicio público, introducido en 1851, consistía en cadencias de reloj transmitidas desde el Observatorio del Harvard. Al año siguiente el Observatorio de Greenwich iniciaba su propio servicio horario, creando un patrón único para Gran Bretaña.

En los Estados Unidos se impusieron cuatro zonas horarias en 1883. Un año después, todos los gobiernos habían reconocido las ventajas de establecer un patrón horario de ámbito mundial para la navegación y el comercio. En la Conferencia Internacional del Meridiano, celebrada en 1884 en Washington, se dividió el globo en 24 zonas (husos horarios). Los signatarios eligieron el meridiano del Observatorio Real de Greenwich como referencia fundamental. Tiene longitud cero, línea a partir de la cual se miden las demás longitudes. Se escogió, en parte, porque dos tercios de los buques del mundo utilizaban ya la hora de Greenwich para la navegación.

Democratización del reloj

Muchos fabricantes de relojes de la época se dieron cuenta de que el mercado de relojes de bolsillo dejaría muy atrás al de los relojes de pared si pudieran reducirse los costes de producción. Sin embargo, la fabricación en serie de las piezas intercambiables se complicaba en los relojes pequeños, puesto que la producción de los componentes miniaturizados exigía una precisión mucho mayor. Aunque desde finales del siglo XVIII se había perfeccionado la producción en Europa, el temor de saturar el mercado y poner en peligro los puestos de trabajo por el abandono de los métodos tradicionales hacía que los relojeros se resistieran a introducir maquinaria para fabricar piezas intercambiables.



8. LA MEDICION PRECISA del tiempo empezó a ser realidad en 1889, cuando Siegmund Riefler diseñó un reloj que funcionaba en un vacío parcial para reducir a un mínimo el efecto de la presión atmosférica. El regulador de Riefler también incluía un péndulo (*no visible*), al que afectaban muy poco los cambios de temperatura. La precisión de este instrumento llegaba a una décima de segundo al día.

CORTESIA DEL MUSEO DEL TIEMPO, ROCKFORD, ILL.

Molesto porque los relojeros estadounidenses parecieran incapaces de competir con los europeos, que al final de la década de 1840 controlaban el mercado, un relojero de Maine, llamado Aaron Dennison se reunió con Edward Howard, operario de una fábrica de relojes en Roxbury, para tratar sobre métodos de producción en serie para relojes pequeños. La empresa de Howard facilitó espacio a Dennison para experimentar y desarrollar la maquinaria necesaria. En el otoño de 1852, se habían completado 20 relojes de pulsera bajo supervisión de Dennison. En la primavera siguiente se terminaron 100 relojes más, y otros 1000 al transcurrir un año. Cuando las instalaciones de Roxbury se quedaron pequeñas, se trasladaron, a finales de 1854, a Waltham con el nombre de Boston Watch Company, produciendo 36 relojes por semana.

La American Waltham Watch Company, nombre final de la empresa, supo aprovechar la enorme demanda de relojes durante la Guerra de Secesión, cuando los ejércitos de la Unión los utilizaron para sincronizar sus operaciones. Los perfeccionamientos técnicos permitieron fabricar grandes series y bajar los precios. Entretanto, se crearon otras empresas en EE.UU. esperando hacerse con una parte del floreciente negocio. Los suizos, que habían venido dominando la industria relojera, se preocuparon por la caída de sus exportaciones a partir de 1870. Una investigación sobre el terreno les hizo ver que la fábrica de Waltham no sólo les aventajaba en productividad, sino que, además, los costes de producción eran inferiores. Incluso había relojes norteamericanos de menor calidad que marchaban con precisión razonable. El reloj había devenido una mercancía accesible a las masas.

Los relojes de pulsera aparecieron en el siglo XIX como un adorno femenino. Sin embargo, en la Primera Guerra Mundial el reloj de bolsillo fue modificado para que pudiera sujetarse a la muñeca y se viera mejor la hora en el campo de batalla. Con ayuda de una intensa campaña de promoción, la moda masculina de relojes de pulsera arraigó al finalizar la contienda. En los años veinte se introdujeron los relojes de pulsera mecánicos de cuerda automática.

Alta precisión

A finales del siglo XIX, el muniqués Siegmund Riefler desarrolló un regulador de diseño enteramente nuevo: un cronómetro de alta precisión que servía de patrón para controlar otros. Sometido a un vacío parcial para reducir al mínimo los efectos de la presión barométrica y equipado con un péndulo muy poco sensible a las variaciones de temperatura, el regulador de Riefler alcanzaba una precisión de una décima de segundo al día. Lo adoptaron los observatorios astronómicos.

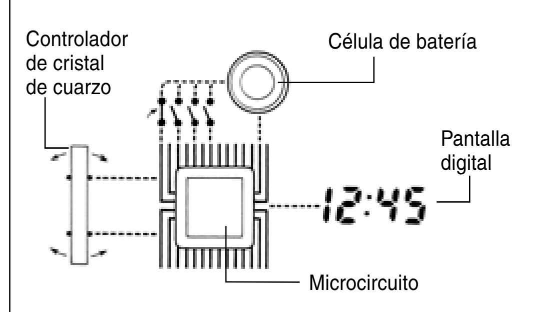
Varios decenios después llegó un nuevo avance. William H. Shortt, un ingeniero ferroviario inglés, proyectó el reloj de péndulo libre, que ofrecía un margen de exactitud de un segundo al año. El sistema de Shortt incorporaba dos relojes de péndulo, uno "maestro" (encerrado en una cámara de vacío) y otro "esclavo" (que contenía las esferas horarias). Cada 30 segundos, el esclavo enviaba una señal electromagnética al maestro; éste, casi enteramente libre de perturbaciones mecánicas, servía de regulador.

Aunque los relojes de Shortt comenzaron a reemplazar a los de Riefler como reguladores para observatorios durante la década de 1920, su superioridad no iba a durar mucho. En 1928 Warren A. Morrison, ingeniero de los Laboratorios Bell, descubrió un generador de frecuencia extremadamente uniforme y fiable, que fue tan revolucionario para la medición del tiempo como lo había sido el péndulo 272 años antes. El cristal de cuarzo, pensado en un principio para su aplicación en

DOS DISPOSITIVOS MODERNOS DE MEDICION DEL TIEMPO

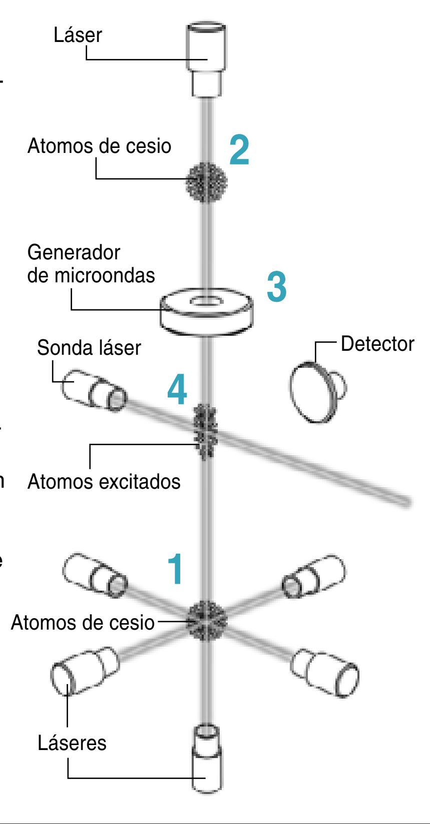
1 *Cuarzo*

A finales de los sesenta del siglo pasado, los relojeros empezaron a alejarse de la rueda volante tradicional con el desarrollo de un oscilador electrónico a transistores. En ese tipo de reloj, las vibraciones de un diminuto diapasón se convertían en movimiento de las manillas. El simultáneo auge de los circuitos integrados de baja potencia y reducido coste y de los diodos fotoemisores (LED) promovió la búsqueda de medidores del tiempo de mayor exactitud. Pronto se adoptó en relojería el resonador de cristal de cuarzo de los transmisores de radio. Los cristales de cuarzo son piezoeléctricos; vibran al ser sometidos a una tensión eléctrica variable, y a la inversa. Cuando se les aplica una tensión en su frecuencia armónica de resonancia, el cristal oscila y vibra como una campana. La salida del oscilador se convierte luego en impulsos adecuados a los circuitos digitales del reloj, que representan la hora en pantalla o accionan eléctricamente las manillas.



2 *Fuente de cesio*

Los relojes de fuente de cesio toman por referencia temporal la frecuencia de la transición de los momentos angulares de electrones que se produce en un átomo de cesio 133 cuando se le aplica una sonda de microondas sintonizadas. En una cámara de vacío, seis láseres ralentizan los movimientos de los átomos de cesio gaseoso, formando una nubecilla (*1*). El cambio de la frecuencia de funcionamiento de los láseres superior e inferior lanza una nube atómica hacia arriba, a través de una cavidad blindada magnéticamente (*2*). La nube desciende por efecto de la gravedad y, al atravesar la cavidad, los electrones de los átomos sufren el bombardeo de un generador de microondas (*3*) cuyas emisiones se ajustan a la frecuencia predeterminada de un oscilador de cristal piezoeléctrico (*no representado*). Las microondas invierten los momentos angulares de los electrones, modificando su estado de energía mecanocuántico. Cuando la nube ha descendido más, una sonda láser torna fluorescente el cesio, revelando si sus electrones han cambiado el momento angular, reacción registrada por un detector (*4*). La señal de salida de este detector se utiliza luego para introducir la ligera corrección necesaria para sintonizar el emisor de microondas a una frecuencia resonante precisa, adecuada para marcar la cadencia de un reloj.



DAVID PENNEY (*izquierda*); ALAN DANIELS (*derecha*)



CORTESIA DEL MUSEO DEL TIEMPO, ROCKFORD, ILL. (*izquierda*); MUSEO NACIONAL DEL TIEMPO (*derecha*)

9. LOS RELOJES DE PENDULO LIBRE fueron ideados por William H. Shortt, en los primeros veinte del siglo pasado. Estos sistemas comprendían dos relojes de péndulo: uno "maestro" (*derecha*) y el otro "esclavo" (*izquierda*). Se decía que medían el tiempo con precisión de un segundo por año.

la radiodifusión, vibra a una frecuencia sumamente regular al ser excitado por una corriente eléctrica. Los primeros relojes de cuarzo instalados en el Observatorio Real en 1939 variaban sólo dos milésimas de segundo por día. Al final de la Segunda Guerra Mundial la precisión se había elevado hasta aproximarse a un segundo cada 30 años.

La técnica del cristal de cuarzo tampoco se mantuvo mucho tiempo como patrón de frecuencia primario. Hacia 1948 Harold Lyons y sus colaboradores, de la Oficina Nacional de Normas en Washington, obtenían el primer reloj atómico basado en un patrón de medición mucho más preciso y estable: la frecuencia de resonancia natural de un átomo, es decir, la oscilación periódica entre dos de sus estados de energía. Los experimentos subsiguientes, acometidos en EE.UU. e Inglaterra, condujeron al desarrollo del reloj atómico de haz de cesio. Actualmente se adopta, como frecuencia patrón para el Tiempo Universal Coordinado, un promedio de las horas marcadas por relojes de cesio instalados en diversas partes del mundo, consiguiendo una precisión mejor de un nanosegundo por día.

Hasta mediados del siglo XX, para determinar la hora patrón se utilizaba el día, período de rotación de la Tierra sobre su eje con relación a las estrellas. Se mantuvo esta práctica, aunque desde finales del XVIII se sospechaba que la rotación axial de nuestro planeta no era enteramente uniforme. Sin embargo, la aparición de relojes de cesio capaces de medir las discrepancias en la rotación terrestre significó que se necesitaba un cambio. En 1967 se adoptó como unidad normalizada de tiempo una nueva definición del segundo, basada en la frecuencia de resonancia de un átomo de cesio.

La medición exacta del tiempo es de tal importancia para el progreso científico que se persigue alcanzar una precisión todavía mayor. Se espera que las generaciones venideras de relojes atómicos, tales como el máser de hidrógeno (oscilador de frecuencia), la fuente de cesio y, en especial, el reloj óptico (discriminadores de frecuencia estos últimos) proporcionen un nivel de precisión (en términos más exactos, estabilidad) de 100 femtosegundos (10^{-15} segundos) por día.

Seguramente mejorará en el futuro nuestra capacidad de medir el tiempo, pero es muy cierto que nunca llegaremos a colmar nuestras aspiraciones en esta materia.

Bibliografía complementaria

GREENWICH TIME AND THE DISCOVERY OF THE LONGITUDE. Derek Howse. Oxford University Press, 1980.

HISTORY OF THE HOUR: CLOCKS AND MODERN TEMPORAL ORDERS. Gerhard Dohrn-van Rossum. Traducido por Thomas Dunlap. University of Chicago Press, 1996.

THE QUEST FOR LONGITUDE: THE PROCEEDINGS OF THE LONGITUDE SYMPOSIUM, HARVARD UNIVERSITY, CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS, NOVEMBER 4-6, 1993. Preparado por William J. H. Andrewes. Collection of Historical Scientific Instruments, Universidad de Harvard, 1996.

SELLING THE TRUE TIME: NINETEENTH-CENTURY TIMEKEEPING IN AMERICA. Ian R. Bartky. Stanford University Press, 2000.

Medición actual del tiempo



Los relojes atómicos en su búsqueda de espacio se están reduciendo al tamaño de microchips, al tiempo que se acercan a los límites de precisión útil

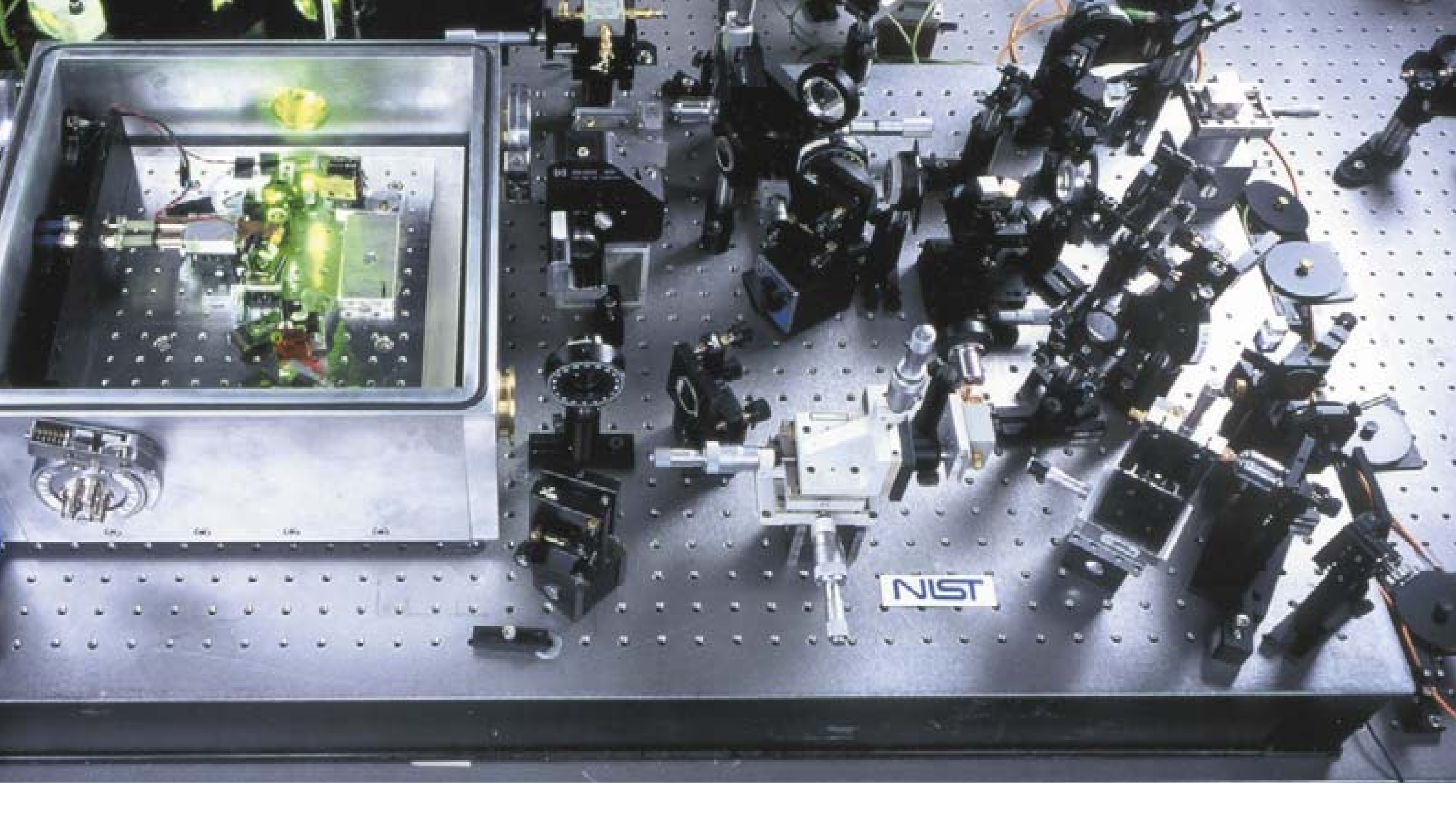
W. Wayt Gibbs

En su última convención mundial, celebrada este año de 2002 en Nueva Orleáns, los horólogos punteros presentaron sus inventos más recientes. No había entre estos relojeros ni un mecánico; no se hablaba de piñones ni escapes de áncora, sino de espectros atómicos y niveles cuánticos. En nuestros días, quienes aspiren a construir relojes todavía más precisos han de tomar las sendas que conducen hacia las fronteras de la física y la ingeniería, y hacerlo simultáneamente en varias direcciones. Están montando en sus prototipos láseres que disparan impulsos de una milbillonésima de segundo de duración adosados a cámaras capaces de enfriar los átomos hasta millonésimas de grado del cero absoluto. Están dejando iones individuales atrapados en pozos viscosos de luz y magnetismo y manipulando el espín de los electrones en sus órbitas.

Merced a progresos técnicos de primera magnitud, la horología de ultraprecisión está avanzando con una velocidad no vista desde hace al menos 30 años. Un buen reloj de haz de cesio es capaz de ir batiendo segundos con una precisión que ronda en torno a un microsegundo al mes, pues su frecuencia de oscilación varía menos de 5 partes en 10^{13}. El patrón primario de tiempo en Estados Unidos, un reloj fuente de cesio instalado en 1999 por el Instituto Nacional de Normalización y Técnica (NIST) en su laboratorio de Boulder, en el estado de Colorado, tiene una precisión de una parte en 10^{15} (o sea, un margen de error de 10^{-15}). Tal precisión es 500 veces mayor que la del mejor de los relojes del NIST de 1975. Aun así, se espera que los relojes residentes en el espacio, que está previsto situar a bordo de la Estación Espacial Internacional en 2005, definan segundos con incertidumbres menores que 10^{-16}. Y los prototipos de los últimos diseños de bases de tiempos que han funcionado con éxito —dispositivos que extraen el tiempo de átomos de calcio o de iones de mercurio, no del cesio— inducen a esperar que en el plazo de tres años la precisión entrará en la escala de 10^{-18}, lo que supondría mejorar la precisión un millar de veces en menos de diez años.

Tal vez no sea "precisión" la palabra justa. En 1967, el segundo fue definido por convenio internacional como "la duración de 9.192.631.770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre dos niveles hiperfinos del estado fundamental del cesio 133". Prescindamos por el momento del significado; la clave está en que para medir un segundo hemos de recurrir al cesio. Ahora, los relojes más perfectos van muy pronto a dejar de usarlo, por lo que, estrictamente hablando, no estarán midiendo segundos. He aquí una de las dificultades que deben resolver los horólogos.

Más fundamental es la limitación que acecha. Como Einstein expuso teóricamente y los experimentos han confirmado, el tiempo no es absoluto. La velocidad de cualquier reloj se ralentiza cuando aumenta la gravitación o cuando el reloj se mueve rápidamente con



INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION Y TECNICA

1. POR MEDIO DE FUGACES IMPULSOS luminosos, este reloj óptico educe señales de tiempo de átomos excitados.

respecto a su observador; incluso para un fotón emitido que reorienta sus polos magnéticos o salta de una órbita a otra. Con la instalación de relojes ultraprecisos en la Estación Espacial, se confía en someter la teoría de la relatividad a las más estrictas verificaciones jamás realizadas. Pero en cuanto los relojes alcancen la precisión de 10^{-18}, proporciones que corresponden a una desviación de menos de medio segundo en toda la edad del universo, serán los efectos de la relatividad los que nos pongan a prueba a nosotros. No existe técnica alguna capaz de sincronizar relojes situados alrededor del mundo con tamaña exactitud.

Inventar la precisión

¿Por qué molestarse, pues, en mejorar los relojes atómicos? La duración de un segundo puede ser medida ya con una precisión de 14 cifras decimales, una precisión 1000 veces mayor que la de cualquier otra unidad fundamental. Una de las razones para aumentarla aún más estriba en que el segundo se está convirtiendo, cada vez más, en *la* unidad fundamental. Tres de las seis unidades fundamentales, concretamente, el metro, el lumen, y el ampère, ya se definen en la actualidad con ayuda del segundo. Puede que el kilogramo y el mol no tarden en seguir el mismo camino. Mediante la celebérrima ecuación $E = mc^2$, se podría convertir la masa en una cantidad equivalente de energía, tal vez un conjunto de fotones cuyas frecuencias correspondan a un determinado algoritmo. Al perfeccionar los relojes, se puede perfeccionar la medición de otras muchas magnitudes.

Los proyectos de relojes portátiles y más estables podrían también proporcionar grandes ventajas a la navegación, al mejorar la precisión y fiabilidad del sistema global de localización (GPS) y del sistema Galileo, el competidor que se está desarrollando en Europa. Relojes más perfectos le facilitarían a la NASA el seguimiento de sus satélites, permitirían que las empresas de servicios y de comunicaciones detectaran fallos en sus redes y ampliarían la capacidad de los geólogos para localizar terremotos o pruebas nucleares. Los astrónomos podrían utilizarlos para conectar sus telescopios de suerte tal, que se refinara enormemente la nitidez de sus imágenes.

Para comprender por qué la horología ha experimentado tan súbita aceleración conviene saber algo acerca del funcionamiento de los relojes atómicos. Un reloj atómico se funda, lo mismo que cualquier otro mecanismo de relojería, en un oscilador, que "bate" con regularidad, y en un contador, que traduce los "latidos" en segundos. En el reloj de cesio, el oscilador no es mecánico (como un péndulo), ni electromecánico (caso

Resumen

- Se espera que el actual renacimiento de la construcción de relojes atómicos permita mejorar 1000 veces la precisión de los sistemas de medición del tiempo.
- En teoría sería posible medir el tiempo con infinita precisión. Pero la gravedad y el movimiento lo distorsionan e imponen límites prácticos a la precisión de los relojes.
- Los relojes atómicos tienen vidas cortas. Se está diseñando también un reloj mecánico capaz de funcionar hasta el año 12.000.

de los cristales de cuarzo), sino mecánico-cuántico: un fotón de luz es absorbido por el electrón más externo del átomo de cesio, provoca la inversión del espín del electrón y, con ello, el cambio de sentido del campo magnético asociado.

A diferencia de péndulos y cristales, los átomos de cesio son todos idénticos. Y cada uno invertirá el espín de su electrón más externo al ser excitado por microondas cuya frecuencia sea de exactamente 9.192.631.770 ciclos por segundo. Para medir segundos, el reloj enclava su generador de microondas en el punto exacto del espectro donde es máximo el número de átomos de cesio que reacciona. Entonces empieza a contar ciclos.

Principio de Heisenberg

En mecánica cuántica, las cosas no son tan sencillas. Para empezar, como siempre, está el principio de indeterminación de Heisenberg, que impone estrictos límites a la precisión con que se puede medir la frecuencia de un fotón aislado. En nuestros días, los mejores relojes logran explorar una franja de 1 hertz de anchura para hallar su centro exacto, más/menos un milihertz, en cada medición individual, a pesar de las limitaciones del principio de indeterminación. Puede ello conseguirse porque, cada vez, se examinan más de un millón de átomos; puesto que no se trata en realidad de una medida sólo, no se transgreden las leyes de la mecánica cuántica.

Esa solución crea, sin embargo, otros problemas. A temperatura ambiente, el cesio es un metal maleable de brillo plateado. Se funde al calor de la mano, formando un charquito dorado, que no se debe tocar, porque reacciona violentamente con el agua. En el interior de un reloj atómico de haz de cesio, un horno calienta este metal hasta que entra en ebullición. Las partículas calientes emitidas entonces atraviesan la cavidad de microondas a diversas velocidades y ángulos. Algunas se mueven tan rápidamente que (a causa de la relatividad) se comportan como si el tiempo se hubiera detenido. A otros átomos, las microondas les parecen (a causa del efecto Doppler) de frecuencia más alta o más baja de la que tienen. Los átomos ya no se comportan todos de idéntica forma, por lo que sus oscilaciones se tornan menos diferenciadas.

A buen seguro, Heisenberg hubiera sugerido que se redujese la velocidad de los átomos. Eso es precisamente lo que han hecho los constructores de relojes. Los cuatro o cinco mejores relojes del mundo —los del NIST, los del Observatorio Naval de los EE.UU., en Washington D.C., y los de los Institutos de Pesas y Medidas de París y de Brunswick— proyectan todos ellos bolitas de átomos de cesio superfríos, que describen un arco similar al del chorro de agua de una fuente ornamental a través de una cámara de microondas. Para condensar el vapor caliente de cesio, con el fin de que forme diminutas bolitas, seis haces de láser concurrentes en un punto frenan a los átomos hasta temperaturas de menos de dos microkelvin: prácticamente, hasta detenerlos casi por completo. La bajísima temperatura no hace sino suprimir casi del todo los efectos relativistas y de corrimiento Doppler; concede medio segundo a un reloj-fuente de dos metros de altura para conseguir la inversión de los espines de los átomos. Los relojes-fuente, introducidos en 1996, eliminaron el 90 por ciento las incertidumbres en el tiempo atómico internacional.

El tiempo en el espacio

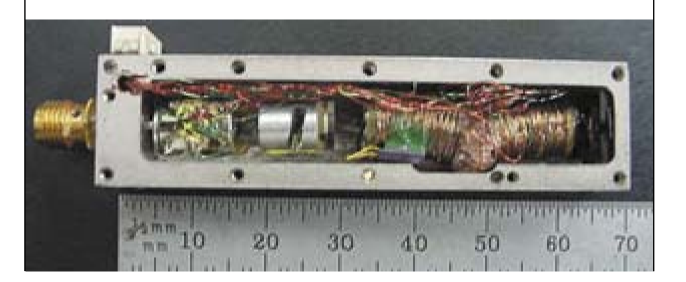
Hace falta tiempo para producir un segundo de buena calidad. Los relojes fuente todavía hacen un poco apresuradamente la tarea. Se necesitaría cuadruplicar la altura de la torre para duplicar el tiempo de observación. En lugar de perforar el techo de su laboratorio, Donald Sullivan, del NIST, está dirigiendo uno de los tres proyectos que pretenden instalar relojes de tipo fuente en la Estación Espacial Internacional. En el espacio se podrá lanzar una bola de átomos a 15 centímetros por segundo a través de una cavidad de 74 centímetros. Se dispondrá entonces de 5 a 10 segundos para la observación. Ya se está trabajando en el reloj espacial primario de referencia atómica, conocido por proyecto PARCS, su sigla inglesa; con un presupuesto de más de 25 millones de euros, debería

PRECISION PORTATIL

Microrrelojes atómicos

SIN GRAN DISPENDIO podría construirse un perturbador de unos 10 watt, dejarlo caer en Nueva York, y bloquear todas las señales de GPS en esa ciudad. La navegación de todo tipo depende hoy del sistema global de localización (GPS). Los relojes atómicos de pequeño tamaño podrían hacer al sistema más fiable. Reducidos al tamaño de relojes de pulsera, podrían ser alojados en los receptores de GPS. La precisión adicional obtenida permitiría que el sistema funcionase en una gama de frecuencias mucho más estrecha e hiciera fracasar a los hipotéticos saboteadores.

La agencia de proyectos avanzados del departamento de defensa estadounidense (DARPA) tiene un programa para desarrollar un reloj atómico en un chip, destinado a las comunicaciones encriptadas y a los receptores de GPS. En 1999 se construyó en el Instituto Nacional de Normalización y Técnica (NIST) un prototipo de 15 centímetros cúbicos (*al pie*). Su último diseño ha reducido ese volumen en un 95 por ciento. Si algún día llegamos a tener relojes atómicos de pulsera, no será para decirnos la hora hasta el último nanosegundo, sino, seguramente, para conservar la privacidad de nuestras conversaciones por el teléfono de pulsera.

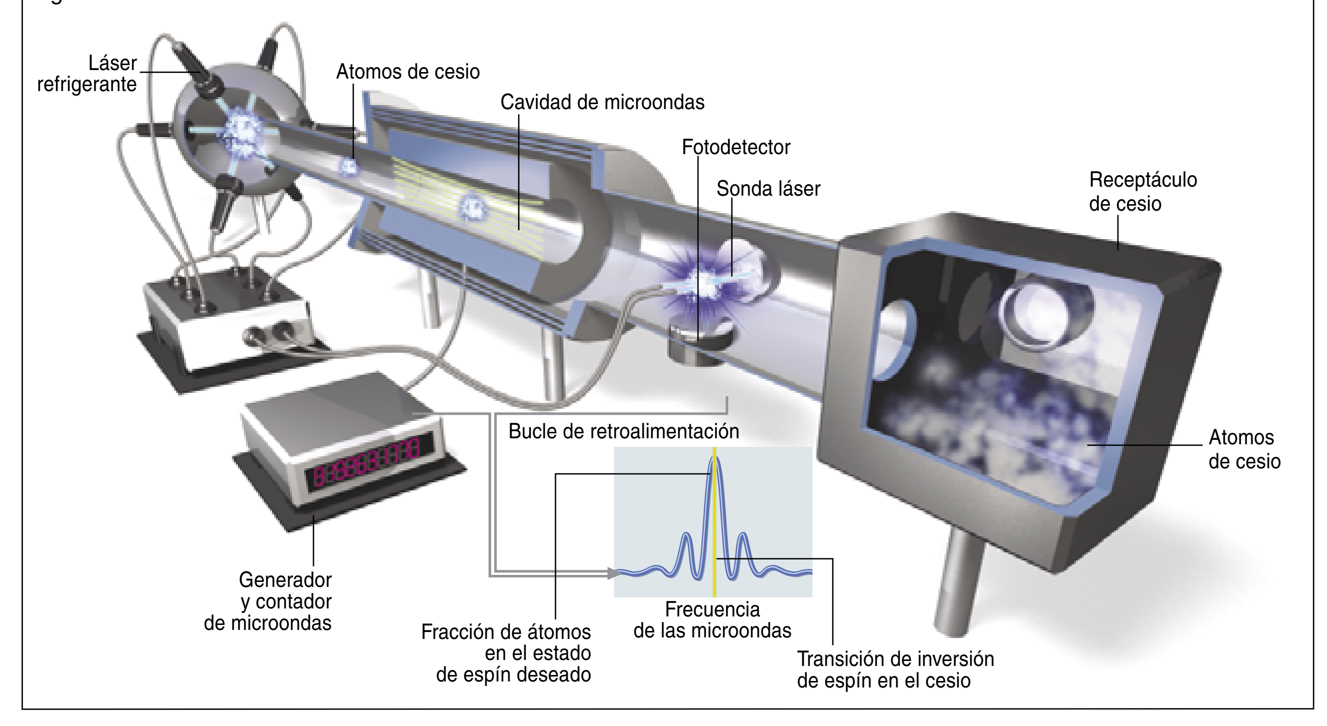


NIST

¿Non plus ultra?

EL RELOJ ATÓMICO "Faraón", construido por el centro nacional francés de estudios del espacio y otros laboratorios, forma parte de la misión ACES. Ha sido ensayado, a bordo de aviones, en condiciones de gravedad nula (*a la derecha*). Está previsto que vuele en la Estación Espacial Internacional en 2005. Faraón, al igual que PARCS, un instrumento similar desarrollado en laboratorios estadounidenses, se propone definir el tiempo con precisión mayor que cualquier reloj situado en tierra. Atomos de cesio, superenfriados mediante láseres hasta condensarlos en diminutas esferas gaseosas, son proyectados a través de una cavidad de microondas, que alteran el espín de los electrones del cesio. Un láser de sondeo vuelve a trastocar los electrones, para determinar cuántos de ellos llegaron al estado deseado. Un bucle de retroalimentación va ajustando la frecuencia de las microondas hasta dejarla enclavada en la frecuencia de resonancia natural de la transición de inversión de espín, con lo que estabiliza la base de tiempos del reloj. Por medios electrónicos es posible contar 9.192.631.770 ciclos de microondas, que corresponden, por convenio internacional, a un segundo exacto.





BRYAN CHRISTIE DESIGN; JEAN-LUC AURIOL *CNES* (*fotografía*)

producir segundos de calidad, cuyo error fuera menor que 5 partes en 10^{17}.

Si, como se espera, el PARCS se lanza a finales de 2005, es posible que se le sume en la Estación Espacial un instrumento creado por la Agencia Europea del Espacio, el sistema de reloj atómico en el espacio (ACES, su sigla inglesa). Ambos relojes se proponen medir, con una precisión de 99,99997 por ciento, las discrepancias entre las mediciones de tiempos en la situación de microgravedad, correspondiente a las órbitas de baja altitud en torno a la Tierra, y las mediciones efectuadas en el suelo.

Está previsto que un tercer sistema, el reloj atómico experimental de rubidio (RACE, por su sigla inglesa), suba a tomar el relevo en 2008. RACE se dispone a reemplazar al cesio, con el que tan familiarizados están los horólogos, por otro de los elementos alcalinos. Téngase presente que, en las mejores fuentes de cesio, la principal de las causas de error es la llamada colisión fría. A temperaturas próximas al cero absoluto, la física cuántica toma el mando y los átomos empiezan a comportarse como ondas; parecen tener un tamaño cientos de veces mayor que el normal, por lo que colisionan mucho más frecuentemente. A la temperatura de un microkelvin, el cesio casi presenta su sección eficaz máxima posible. En cambio, el tamaño efectivo de los átomos de rubidio es 50 veces menor. Esta propiedad debería permitir que RACE alcanzase una precisión de orden 10^{-17}, una quinta parte de las incertidumbres de PARCS y ACES.

Los relojes de rubidio ofrecen otra ventaja, a saber: la oportunidad de buscar fluctuaciones en la constante "alfa". Esta constante de estructura fina determina la intensidad de las interacciones electromagnéticas en átomos y moléculas. Su valor está muy próximo a 1/137, un número adimensional. Aunque no existe,

Extracción de tiempo de un átomo

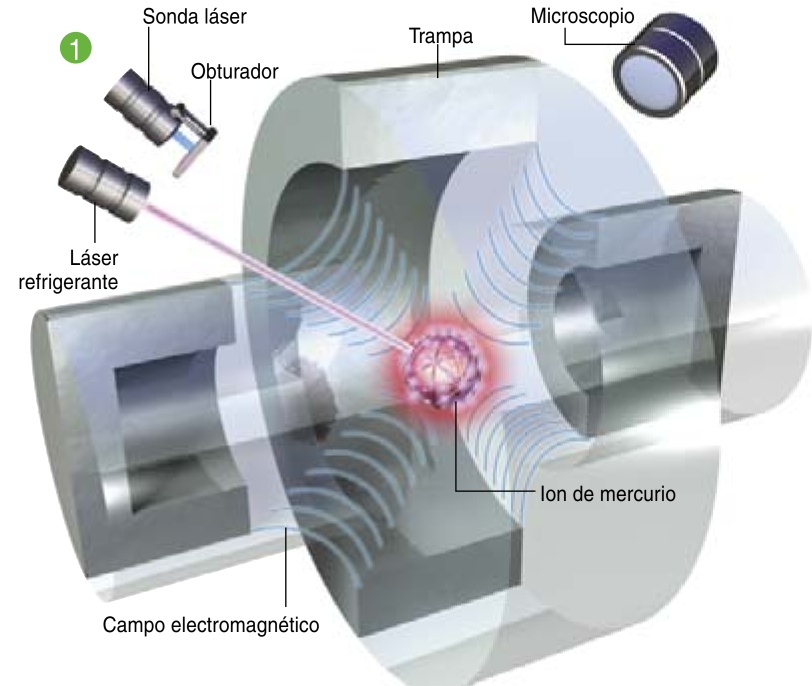
TODO RELOJ consta de, al menos, dos componentes fundamentales: un oscilador y un contador. La enorme precisión de los relojes atómicos se debe a un tercer elemento: un sistema de retroalimentación que consulta periódicamente una referencia atómica para mantener las vibraciones del oscilador con una regularidad casi perfecta.

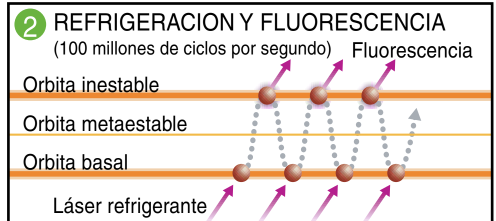
En un reloj iónico óptico, lo más avanzado técnicamente hoy, el oscilador es un láser ultravioleta, que actúa de sonda. Mediante impulsos emitidos de un láser de luz infrarroja se logra un contador. La referencia definitiva es un electrón que orbita alrededor de un átomo de mercurio, punto menos que inmóvil.

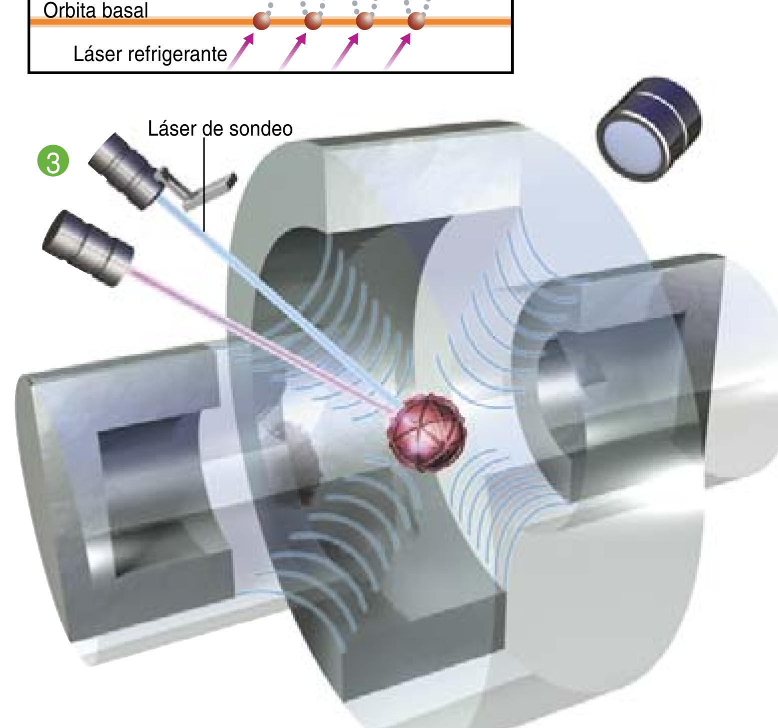


Atrapado y estimulado

EL ÁTOMO, expulsado por calor de un horno con mercurio, es ionizado por una corriente eléctrica, que le arranca uno de sus electrones y lo deja con una carga positiva. Después, el ion es confinado en el centro de una trampa anular (*1*) mediante un campo electromagnético. El haz de un láser, llamado refrigerante (*en púrpura*), provoca que el electrón más externo del ion salte millones de veces por segundo a una órbita más alta, metaestable, fluoresciendo cada vez que retorna al nivel basal (*2*). La fluorescencia tiene doble función: enfría el átomo casi hasta el cero absoluto y permite verificar (a través de un microscopio) que el reloj sigue en funcionamiento. El átomo enfriado, estabilizado y brillante, se encuentra listo para servir de referencia del reloj.

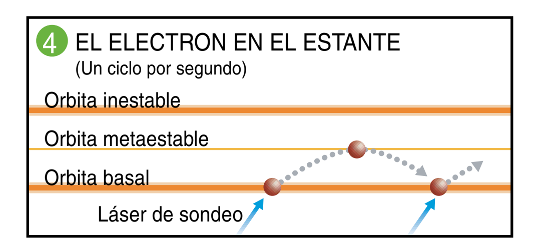






Láser de sondeo

LO MÁS CERCANO a la base de tiempos de un reloj atómico es el láser de sondeo (*en azul*). El color del chorro de fotones emitidos por el láser expresa su frecuencia de oscilación. Para verificar que tal frecuencia no ha variado, el láser lanza periódicamente un destello sobre el átomo de mercurio (*3*). El color de muestreo es sintonizado a la frecuencia exacta que eleva al electrón externo del ion hasta una órbita metaestable, y lo aloja "en el estante" durante tiempos de hasta medio segundo (*4*). Cuando el láser es sintonizado a esta frecuencia especial, el electrón deja de ser fluorescente y el ion se torna oscuro. Si la frecuencia del láser oscilador fluctúa, el ion vuelve a destellar.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

en apariencia, ninguna razón para que posea el valor concreto que tiene, constituye, sin embargo, un número importante, pues si su valor fuese muy distinto el universo no podría cobijar la vida en la forma que conocemos.

En el modelo estándar, la constante de estructura fina tiene un valor inmutable por toda la eternidad. Pero en algunas teorías que compiten con él (como ciertas teorías de cuerdas), el valor de alfa podría fluctuar ligeramente, e incluso ir aumentando con el paso del tiempo. Un grupo de astrónomos, en agosto de 2001, informó de la existencia de indicios preliminares de que alfa pudo haber aumentado una parte en 10.000 durante los 6000 últimos millones de años. Es cuestión difícil de dilucidar. Por comparación de los relojes de rubidio con los basados en el cesio o en otros elementos, tal vez resulte factible dividir por 20 el posible intervalo de fluctuación de alfa.

Los láseres regulan

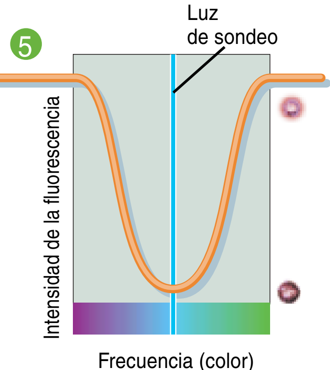
Salvo por la sustitución del cesio con rubidio, el RACE será un reloj fuente bastante típico, que encomienda a láseres la tarea de enfriar los átomos, y a microondas, la de invertir el espín de los electrones y marcar las señales de tiempo. Se trata de un diseño bien probado y fiable. Que no tardará en caer en desuso.

En agosto de 2001, Scott A. Diddams y sus colegas en el NIST informaron de la puesta en funcionamiento, durante un breve tiempo, de lo que muchos constructores de relojes habían pensado que nunca podrían llegar a ver: un reloj atómico óptico basado en un solo átomo de mercurio. Puede parecer natural que, tras haber logrado la licenciatura en microondas, donde se manejan frecuencias de gigahertz, se quiera hacer el doctorado en luz visible, bien adentradas las frecuencias de terahertz en el espectro electromagnético. Los fotones ópticos disponen de energía suficiente para hacer saltar limpiamente un electrón hasta la capa orbital siguiente; no habrá necesidad de complicarse con sutilezas como el espín. Pero aunque el oscilador funciona todavía a frecuencias de terahertz, el contador falla. Nadie sabe cómo contar 10^{16} ciclos por segundo, se aduce, necesitados como se está de un puente hasta el régimen de microondas, donde sí disponemos de contadores electrónicos.

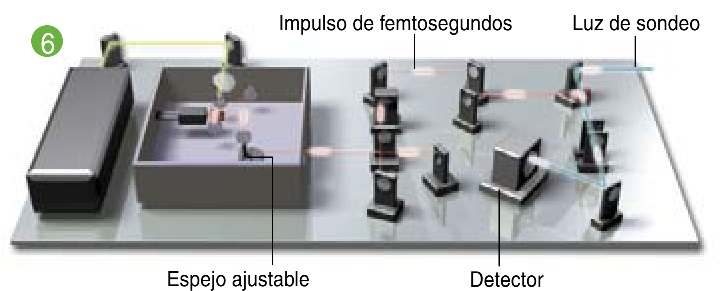
Entra en escena la regla de graduación óptica. En 1999, Thomas Udem, Theodor W. Hänsch y otros investigadores del Instituto Max Planck de Optica Cuántica, en Garching, idearon un procedimiento para la medición directa de frecuencias ópticas. Se valieron de un láser de referencia que emite impulsos al ritmo de 1 gigahertz. Cada uno de estos impulsos lumínicos tiene una duración de sólo un par de docenas de femtosegundos. (Un femtosegundo es un tiempo muy, muy breve. Cada segundo contiene más femtosegundos que horas ha contado el universo desde la gran explosión.)

Un láser emite un haz continuo de luz monocromática. Pero al ser pulsado, se obtiene en cada destello una mezcolanza de colores. El análisis espectral de un impulso de 1 femtosegundo es verdaderamente

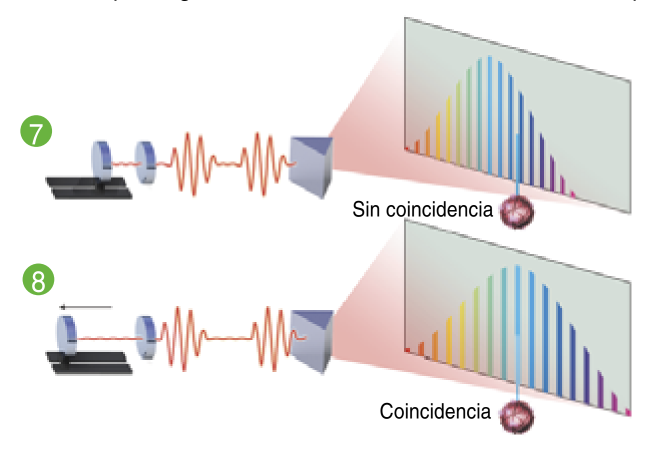
Igualado y medido



UN SISTEMA de realimentación ajusta el color del láser hasta que la fluorescencia es mínima (*5*). La luz de sondeo, que es ahora estable como una roca, se transmite hasta un contador mediante una fibra óptica. La luz de la sonda tiene una frecuencia situada en los trillones (10^{18}) de ciclos por segundo, que no es posible contar directamente. Un tercer láser actúa de desmultiplicador, para traducir las señales de tiempo desde trillones de ciclos hasta meros miles de millones. Este tercer láser emite impulsos infrarrojos de sólo unos pocos femtosegundos de duración, separados por intervalos de os-



curidad (*6*). La técnica consiste en ajustar exactamente la frecuencia de sus impulsos con la frecuencia de la luz de sondeo. A tal fin, el reloj saca partido de un hecho curioso: al atravesar un prisma, cada impulso ultrabreve se escinde en un arco iris de colores individuales regularmente separados en el espectro de frecuencias, como los dientes de una cremallera (*7* y *8*). Es posible, moviendo un espejo ajustable, modificar la separación de los impulsos y contraer o dilatar, en consecuencia, la gama de frecuencias transportadas por cada impulso. Se puede lograr así que la cremallera se sitúe de modo que uno de sus dientes coincida con el color (y con la frecuencia, por tanto) de la luz de sondeo y quede engranada al rígido comportamiento del ion de mercurio. Un detector electrónico cuenta entonces los impulsos sincronizados, que, emitidos miles de millones de veces por segundo, van marcando el transcurrir del tiempo.



Un reloj para la eternidad

SAN RAFAEL (CALIFORNIA). La NASA, en una de sus sedes en la Red, se ufana de que un reloj atómico encargado para la Estación Espacial "será el reloj más preciso jamás construido; dará la hora con un error máximo de un segundo cada 300 millones de años". Los horólogos atómicos se expresan muchas veces como si sus artilugios pudieran funcionar sin interrupción durante miles de siglos. Baladronadas: un reloj de cesio típico no dura más de 20 años. Hasta un reloj de pulsera de buena calidad puede funcionar mucho más tiempo.

Pero en un pequeño taller mecánico de nuestra localidad, justo al norte de San Francisco, un reducido grupo de futuristas e ingenieros está refinando el diseño de un reloj mecánico proyectado para que funcione durante mil decenios. El "reloj del presente duradero", nombre que le da Danny Hillis, su principal proyectista, constituye tanto un experimento sociológico cuanto un cronómetro operativo.

"Los relojes son símbolos de continuidad; un reloj muy perdurable podría dar perspectiva, ayudarnos a no concebir el año 3000 como mera abstracción", opina Hillis. "Al mirar hacia el pasado, vemos indicios de civilización que se remontan unos 10.000 años; me pareció que un período así resultaría apropiado para mirar adelante."

Hillis, con la ayuda del escritor Stewart Brand, del músico Brian Eno y de otras personas, está procurando crear un artefacto no sólo duradero, sino también inspirador. Será necesario "darle cuerda" al reloj una vez al año. "Y cuando alguien llegue hasta él por primera vez, solamente mostrará qué hora era la última vez que estuvo allí una persona", explica Hillis. "Seguirá midiendo el tiempo, pero será necesario darle cuerda —aportarle algo de energía— para hacer que avance e indique qué hora es en ese momento."

Brand y Hillis son copresidentes de una fundación que adquirió hace poco el pico de una montaña de Nevada, en cuyo interior confían instalar el reloj definitivo, de tamaño monumental. Los rayos de sol de mediodía, colimados por una rendija del techo de la caverna, serán enfocados sobre una lámina bimetálica, que libera un peso destinado a resincronizar el reloj, en el supuesto de que haya perdido la hora.

El tamaño del segundo prototipo dobla el del primero, que se halla expuesto en el Museo de la Ciencia, en Londres. Sin embargo, en lugar de un dial circular, el reloj ha sido ahora ornado con un gran planetario. Debajo de la "esfera" se asienta una pila de siete anillos metálicos, de 30 pulgadas (762 mm) de diámetro, provistos de palancas. Unos pasadores verticales insertos en los anillos embragan las palancas mientras los aros giran, que funcionan como una computadora mecánica binaria para contar las horas y calcular la fecha.





EL RELOJ para 10.000 años desarrollado por la fundación Long Now será estrictamente mecánico. Al igual que el primer prototipo del reloj, la versión definitiva, monumental, se valdrá seguramente de un péndulo de torsión para contar los minutos, pero solamente mostrará el año en curso, el siglo y el milenio (*abajo*).

ROLFE HORN, CORTESIA DE LA FUNDACION LONG NOW

impresionante: está formado por millones de líneas nítidas que se extienden por todos los colores del arco iris, cada una exactamente equidistante de sus vecinas, como si fuesen las divisiones de una regla graduada. La posibilidad de construir un láser que pulse mil millones de veces por segundo y cuyas frecuencias constituyentes sean todas ellas estables con un margen de 1 hertz, resulta punto menos que increíble.

El grupo de Diddam en el NIST ha construido un reloj óptico rudimentario, basado en iones de mercurio, que inmovilizan en una trampa electromagnética. Dado que a cada átomo le falta un electrón, los iones portan carga positiva y se repelen entre sí, por lo que las colisiones dejan de ser problema. Aunque el sistema resulta todavía demasiado frágil para mantenerse en funcionamiento continuo, el dispositivo es estable hasta variar menos de 6 partes en 10^{16} en el transcurso de un segundo. En períodos más largos la incertidumbre podría acercarse a 10^{-18}. El mercurio no es, pues, el elemento ideal. La transición utilizada en este caso como base de tiempos puede sufrir corrimientos por efecto de los campos magnéticos, que son difíciles de eliminar del todo. En el indio hay una transición prometedora.

Udem y Hänsch han estado investigando el indio y, en efecto, parece ser perfectamente capaz de llevar los relojes "hasta el orden 18 de magnitud". Hay grupos en el Instituto Federal de Física y Metrología de Brunswick, y en otros lugares que están experimentando con átomos de calcio sin ionizar. Dado que los átomos eléctricamente neutros pueden ser apiñados en la trampa más densamente que los iones, los experimentos parecen ir en buen camino. Si bien está todavía por saber si un reloj de sólo 50 iones podrá ir mejor que otro con 100 millones de átomos neutros.

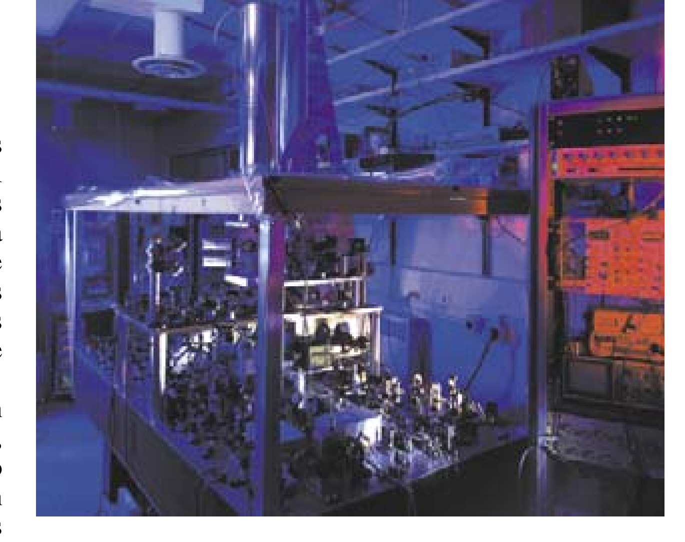
Tiempo inconstante

No obstante, sí cabe esperar que pronto se obtendrán relojes con precisiones de 17 cifras. Pero hemos topado otra vez con la palabrita: precisión. Los relojes ópticos se separan de la definición atómica del segundo, que se basa en las propiedades del cesio. Una definición habrá de cambiar si queremos que las bases de tiempos más modernas y perfectas sean estrictas guardianas de la hora a la que hemos de ajustar nuestros relojes. A este respecto, la comisión de tiempo de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM, en sigla inglesa), órgano decisorio en tales cuestiones, aceptó hace poco una propuesta de admitir definiciones "secundarias" que establezcan la equivalencia de una frecuencia del cesio con la de otros átomos. Si la asamblea plenaria de la BIPM aprueba la idea, la definición de segundo será ampliada, aunque también debilitada.

Los horólogos no podrán sortear tan fácilmente las dificultades impuestas por la relatividad. Los relojes que alcancen precisiones de una parte en 10^{17} —un milisegundo en tres millones de años— quedarán desincronizados a causa de efectos relativísticos. Está, en primer lugar, la dilatación del tiempo: los relojes en movimiento atrasan. La velocidad de la marcha a pie produciría ya un corrimiento de 10^{-17} en la frecuencia.

La otra causa de error es la gravitación. Cuanto más intensa sea su atracción, más lentamente corre el tiempo. Los relojes ubicados en la cima del Monte Everest experimentarían un adelanto de unos 30 microsegundos al año con respecto a los situados a nivel del mar. "Ya nos resulta necesario tener en cuenta este efecto cuando comparamos relojes instalados en distintas plantas de nuestro edificio", afirma Sullivan. Al elevar el reloj 10 cm, su frecuencia varía una parte en 10^{17}. Y la elevación es relativamente fácil de medir, en comparación con las variaciones de gravedad provocadas por la geología local, las mareas e incluso los desplazamientos de magma a kilómetros de profundidad.

En última instancia, si se toma nuestra capacidad para separar líneas espectrales mediante relojes de microondas, y se extrapola a las reglas ópticas, eso nos sitúa en incertidumbres de 10^{-22}. Lo que no significa que se llegue pronto a esa cota. Y no es que haya un motivo especial para darse prisa: nadie tiene la más mínima idea sobre la forma de transferir tiempo entre dos relojes con tan enorme precisión. ¿De qué sirve un reloj si no es posible moverlo, ni contrastarlo con otro?



2. EL RELOJ PRIMARIO para Estados Unidos es el reloj de fuente de cesio NIST-F1, instalado en Boulder, estado de Colorado. Se trata de uno de los alrededor de 200 relojes cuyos tiempos son promediados para producir el Tiempo Universal Coordinado (UTC).

NIST

Bibliografía complementaria

SPLITTING THE SECOND: THE STORY OF ATOMIC TIME. Tony Jones. Institute of Physics Publishing, 2000.

LÁSER DE PULSOS ULTRACORTOS. John-Mark Hopkins y Wilson Sibbett, en *Investigación y Ciencia*, págs. 48-56, noviembre de 2000.

AN OPTICAL CLOCK BASED ON A SINGLE TRAPPED $^{199}Hg^{+}$ ION. Scott A. Diddams *et al.*, en *Science*, vol. 293, págs. 825-828; 3 de agosto de 2001.

Tiempo y envejecimiento de los materiales

El tiempo deja su huella en los materiales que, como los seres vivos, envejecen. Unos se dejan llevar hacia un reposo equilibrado mientras que otros, los materiales biológicos, luchan por mantener su juventud

Manuel Elices Calafat

Se dice que el sonido de las campanas mejora con el tiempo, pero el bronce es un material que apenas envejece. Desde la más remota antigüedad, los chinos atribuían poderes mágicos al sonido de las campanas y las usaban en sus caballos y carrozas para asustar a los demonios. El misterioso sonido de las campanas siempre ha estado envuelto en un fuerte simbolismo y el paso del tiempo no le podía ser ajeno. Sabemos que los materiales envejecen y que con el paso del tiempo algunas propiedades mejoran y otras no. Hay materiales de vida efímera y otros, como los diamantes, son —casi— para la eternidad.

De todo ello se hablará en esta breve incursión por un tema tan apasionante y veremos que el tiempo deja su huella en los materiales de muchas formas. Comentaremos, en primer lugar, cómo algunos materiales con la ayuda del tiempo y sus aliados —la temperatura y la tensión— buscan el equilibrio que perdieron. Después entrarán en escena agentes externos —como el oxígeno, el agua o la radiación— que, en cooperación con el tiempo, pueden acelerar el envejecimiento y la muerte de los materiales. Por último, consideraremos materiales vivos —que luchan contra el tiempo y los agentes externos para conservar su juventud—, porque pueden proporcionar ideas para el diseño de la nueva generación de materiales inteligentes.

El autor

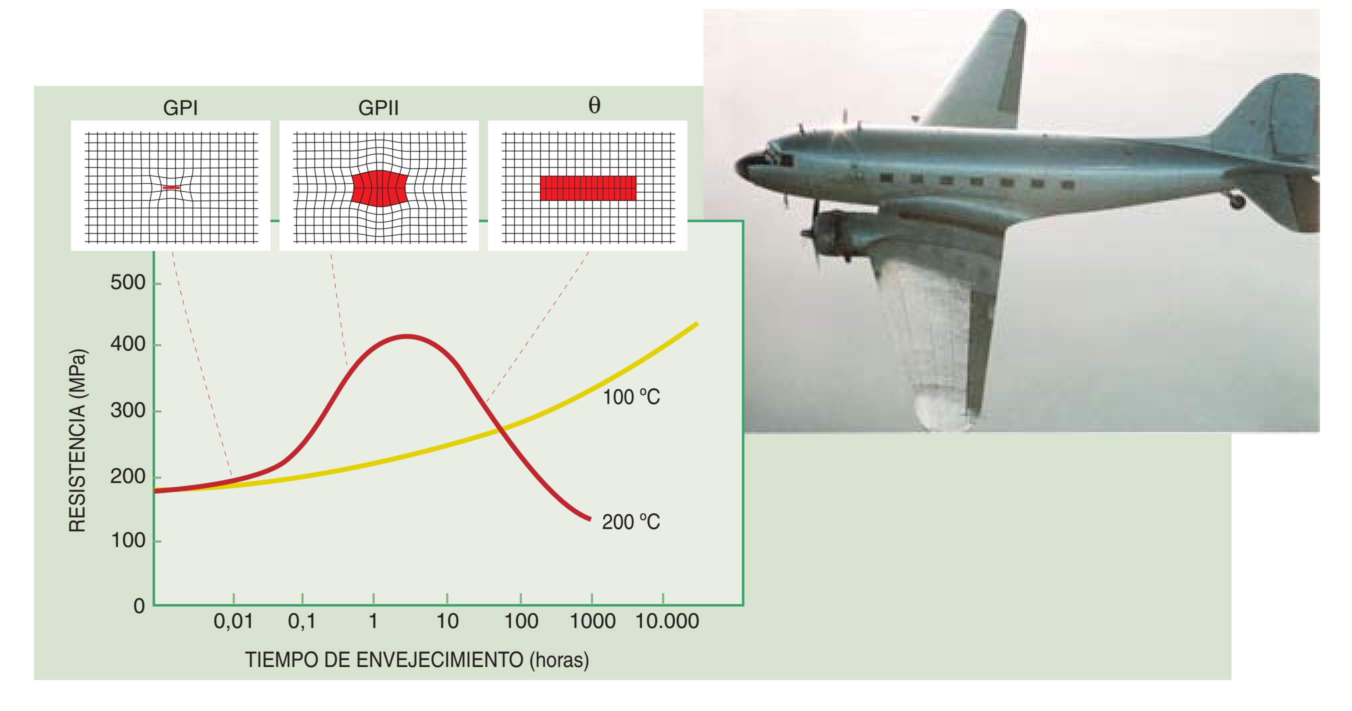
MANUEL ELICES CALAFAT, catedrático de ciencia de materiales, dirige el departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidad Politécnica de Madrid. Presidente de instituciones europeas sobre ciencia de los materiales, Elices es miembro de la Real Academia de Ciencias y de la Academia de Ingeniería.

En busca del equilibrio perdido

En 1906, Alfred Wilm, director del departamento de metalurgia de un instituto de investigación en los aledaños de Berlín, buscaba un material dúctil y menos pesado que el latón para fabricar vainas de municiones. Experimentaba con aluminio, metal que sólo se utilizaba en joyería, cubertería y en aplicaciones que no requerían gran resistencia mecánica. Ensayaba aleaciones de aluminio y estimaba su dureza presionando sobre ellas una bola de acero y midiendo la huella que dejaba. Al probar una aleación con pequeñas cantidades de cobre y magnesio, observó que la huella era demasiado profunda para que el material fuera de alguna utilidad. Dos días más tarde, quizás en un exceso de celo, Wilm y su ayudante repitieron el ensayo y se sorprendieron al comprobar que la huella era menor: la aleación había endurecido. El endurecimiento continuó durante algunos días más hasta triplicar el valor inicial. Wilm había descubierto el *endurecimiento por envejecimiento*.

El descubrimiento mostraba que los metales, una vez solidificados, no son materiales inertes; cambian y envejecen con el tiempo. Más aún, daba la impresión de que según la alimentación —el tipo y cantidad de aleantes— el envejecimiento podía ser mejor o peor.

En 1909, la aleación descubierta por Wilm —llamada *Duralumin*— se comercializó. En 1910 ya se fabrica-



1. EL ENVEJECIMIENTO DEL ALUMINIO contribuyó decisivamente al desarrollo de la industria aeronáutica. En la figura se muestra la variación de la resistencia del aluminio cuando se envejece a 200 ºC y a 100 ºC. La distorsión de la red cristalina y los precipitados dificultan el movimiento de las dislocaciones.

ron 13 toneladas y diez de ellas se vendieron a la compañía inglesa Vickers, que las utilizó para construir el dirigible *Mayfly*. Un desgraciado accidente lo partió en dos cuando lo trasladaban desde el taller al hangar. Aunque la causa de la rotura se debió a un fallo humano, los ingleses consideraron que el Duralumin alemán no era un material fiable y no hicieron más pedidos.

El gobierno alemán, por el contrario, decidió apoyar estas aleaciones que envejecían y en 1914 las recomendó para fabricar zepelines para la marina germana. Se construyeron 97 dirigibles y se utilizaron 9 toneladas de Duralumin para los modelos mayores. El aumento de la resistencia de las aleaciones de aluminio debido al envejecimiento permitió la construcción de aviones y contribuyó, de forma decisiva, al desarrollo de la industria aeronáutica.

La justificación del endurecimiento con el paso del tiempo —también llamado endurecimiento por precipitación— tuvo que esperar algunos años, hasta que se dispuso de las técnicas adecuadas —microscopía electrónica y difracción con rayos X— para observar y cuantificar distintos aspectos del fenómeno.

En los metales, la deformación plástica —y, en cierto modo, la ductilidad— se debe, principalmente, al movimiento de las dislocaciones. La introducción de obstáculos al desplazamiento de las dislocaciones reduce la deformación plástica y puede favorecer el endurecimiento y aumentar la resistencia.

El endurecimiento con el tiempo en la aleación de aluminio —4 % en peso de cobre y pequeñas cantidades de magnesio, silicio y manganeso— halla su justificación, a grandes rasgos, en el carácter de la aleación, que, en estado líquido, es una solución de cobre sobresaturada. Al enfriarla —al solidificar— el exceso de cobre forma precipitados metastables, de cuya estructura y composición dependen las propiedades mecánicas de la aleación. Por este motivo las aleaciones se tratan térmicamente durante un cierto tiempo para conseguir el tipo de precipitado deseado, proceso conocido como *envejecimiento artificial* o maduración.

Temperatura

¿Cómo varía la resistencia con la duración en un tratamiento, típico, a 200 ºC? (*véase figura 1*). Cuando la solución se ha enfriado rápidamente hasta temperatura ambiente, el exceso de cobre precipita en forma de pequeños discos —alrededor de 10 nanómetros (10 millonésimas de milímetro) de diámetro y 0,1 nm de espesor, llamados zonas de Guinier-Preston (GP.I) en honor de sus descubridores. Estos precipitados son coherentes con la matriz. Ahora bien, puesto que el tamaño de los átomos de aluminio difiere del de los átomos de cobre, la red cristalina queda distorsionada, lo que dificulta el movimiento de las dislocaciones, produciendo un endurecimiento del material. Si se mantiene la aleación más tiempo a esta temperatura las GP.I crecen —los tamaños pueden ser del orden de 150 nm de diámetro y 15 nm de espesor— y se transforman en GP.II (o fases θ''). Estas estructuras impiden todavía más el movimiento de las dislocaciones y, por consiguiente, aumentan la resistencia.

Un posterior envejecimiento provoca la transformación en una nueva fase —llamada fase θ'— responsable de la resistencia máxima. Si se mantiene la aleación más tiempo a estas temperaturas, pasaremos a la fase estable —fase θ—, que ya no es coherente con la matriz, la distorsiona menos y no impide tan eficazmente el movimiento de las dislocaciones. Además, durante el envejecimiento el número de obstáculos ha disminuido porque se han agrupado en partículas mayores. Todo ello hace que la aleación pierda resistencia. Se dice que ha

M. ELICES Y J. M. MARTINEZ



2. EL ALARGAMIENTO, por fluencia, de los cables que sostienen un puente atirantado (*figura superior*) o las pérdidas de tensión, por relajación, en las armaduras de un puente de hormigón pretensado (*figura inferior y detalle de los anclajes*), son dos formas de envejecimiento favorecido por solicitaciones mecánicas.

M. A. ASTIZ (CARLOS FERNANDEZ CASADO, S. L. OFICINA DE PROYECTOS)

sobreenvejecido. Esta transformación no sucede a temperaturas por debajo de 100 ºC; por esa razón, en el *envejecimiento natural*, a temperatura ambiente, sólo se produce un aumento de la resistencia con el paso del tiempo.

El endurecimiento por envejecimiento es un fenómeno frecuente en los materiales con componentes metastables, que no están en equilibrio, y se aprovecha para diseñar materiales con propiedades nuevas. Las aleaciones de aluminio que endurecen por envejecimiento sólo pueden utilizarse a temperaturas moderadas. Para superar este inconveniente se han desarrollado las superaleaciones —basadas en el mismo fenómeno, pero con níquel en vez de aluminio— que permiten alcanzar 1000 ºC sin que sobreenvejezcan.

Tensión mecánica

No sólo la temperatura acelera el paso del tiempo. La tensión mecánica favorece también el envejecimiento. Los materiales envejecen por *fatiga* cuando se someten a una tensión mecánica alternativa. También, si la temperatura es suficientemente elevada, *fluyen* cuando la tensión mecánica es constante o *relajan* sus tensiones si permanece constante la deformación.

En el lento y majestuoso desplazamiento de los glaciares se nos ofrece otro ejemplo de la influencia del tiempo en un material abundante: el agua helada. Las enormes masas de hielo se mueven por *fluencia*, una forma particular de envejecimiento debida a la acción combinada del peso y del tiempo. Los glaciares son una fuente que nutre de icebergs los mares polares; sus colores también están relacionados con la edad: los icebergs de un azul intenso indican un hielo de muchos años.

En los metales, la fluencia y la relajación se deben al movimiento de las dislocaciones y otras imperfecciones que, favorecidas por la temperatura y las tensiones, buscan con el paso del tiempo posiciones de equilibrio más estables. Los ingenieros tienen en cuenta estos fenómenos y tratan de utilizar los materiales a temperaturas y solicitaciones mecánicas suficientemente bajas para que este tipo de envejecimiento no se manifieste durante la vida prevista de la estructura. Así, el alargamiento —por fluencia— de los cables que sostienen un puente colgante o las pérdidas de tensión —por relajación— en las armaduras de un puente de hormigón pretensado están controlados para que permanezcan dentro de unos márgenes de seguridad.

Durante la fabricación de los cables de acero, al final del trefilado, se les somete a un proceso de envejecimiento artificial —en realidad debería llamarse envejecimiento prematuro— mediante un tratamiento termomecánico. El objetivo es acelerar el efecto del tiempo. Así, cuando se instalan, ya han apaciguado sus ímpetus juveniles —fluyen o relajan poco—, apenas se deforman y pierden poca tensión. Después del trefilado, a veces, se lleva al alambre a un viaje por el tiempo en forma de una serie de doblados alternativos —práctica conocida como "pasar por el purgatorio"— con objeto de enderezarlo antes de envejecerlo; se trata de un purgatorio en vida.

Cuando no es posible trabajar a bajas temperaturas y deben evitarse deformaciones excesivas por fluencia, se recurre a diseñar materiales que apenas padezcan ese envejecimiento. Los álabes de los turboreactores —que operan a temperaturas muy elevadas (1300 ºC o más)— nos ofrecen un

buen ejemplo. Las superaleaciones constituyen un estupendo material de partida porque contienen muchos obstáculos —en forma de átomos en solución sólida y precipitados— que dificultan el movimiento de las dislocaciones que van en busca del equilibrio.

Hasta 850 ºC este tipo de fluencia, debido al movimiento de las dislocaciones, se puede controlar. Pero a temperaturas mayores se activan otros mecanismos de fluencia que dependen de las fronteras de los granos cristalinos. Para obviar el problema y aumentar, un poco más, la temperatura de trabajo se opta por fabricar álabes monocristalinos —sin fronteras de grano— o con cristales muy alargados, con las fronteras de grano paralelas a la dirección de la tensión que van a soportar. Todas estas estrategias han permitido que las superaleaciones puedan subsistir más tiempo, sin envejecer, llevando una vida muy intensa.

Envejecimiento en estado puro

Hay materiales que envejecen con independencia de la temperatura, de las tensiones o de otras acciones físicas que provengan del exterior. Son materiales que envejecen —por decirlo de alguna manera— en estado puro. Envejecen tan bien, que los utilizamos como cronómetros para medir el tiempo y para conocer la edad de otros materiales. Hablamos de los materiales *radiactivos*.

La mayoría de los núcleos atómicos son inestables; abandonan de forma espontánea su estado para pasar a otra configuración de menor energía, de mayor equilibrio. Se llama *actividad radiactiva* de un material al número de desintegraciones que se efectúan por unidad de tiempo; dicha actividad es proporcional al número de núcleos existentes en cada instante. Si se conoce esta constante de proporcionalidad, si puede estimarse la cantidad inicial de núcleos y si se sabe medir el número de núcleos actuales, entonces, con esos tres datos, se puede calcular el tiempo que ha transcurrido o, dicho en otras palabras, la edad del material.

Se conocen tres cadenas radiactivas naturales, encabezadas por isótopos del uranio y el torio: ^{238}U, ^{235}U y ^{232}Th. Con el paso del tiempo, estos elementos se van transformando en otros por radiación y las tres cadenas terminan, respectivamente, en los isótopos estables del plomo ^{206}Pb, ^{207}Pb y ^{208}Pb. Otros núcleos radiactivos naturales, como el ^{14}C, el ^{40}K y el ^{147}Sm, no forman parte de ninguna serie.

El envejecimiento de algunos materiales radiactivos nos permite fechar la edad de otros. A partir de la desintegración del ^{234}U en ^{230}Th (productos intermedios de la serie del ^{238}U), por ejemplo, se han datado sedimentos marinos, corales, conchas de moluscos o huesos. Las técnicas basadas en el ^{14}C han suministrado valiosas informaciones a los arqueólogos y han permitido conocer, con más precisión, el momento en que nuestros antepasados del Magdaleniense dibujaron los espléndidos bisontes de la Cueva de Altamira. El transcurso del tiempo en los materiales radiactivos ofrece oportunidades insospechadas para acreditar obras de arte, por citar un botón de muestra. En los restos de las tres cadenas radiactivas mencionadas se apoyó la certificación de autenticidad de un cuadro de Rubens.

La composición isotópica de muchos elementos que se encuentran en la naturaleza es estable. En otras palabras, el porcentaje entre dos isótopos de un elemento es el mismo, se extraiga el elemento en cuestión de una mina australiana o de una europea. Gracias a las excepciones detectadas se ha podido conocer el origen geográfico de estos elementos.

El plomo nos ofrece una de tales excepciones. Su composición isotópica varía de un lugar a otro, dependiendo de la edad geológica y del origen geoquímico. Se trata de un elemento con cuatro isótopos estables —^{204}Pb, ^{206}Pb, ^{207}Pb y ^{208}Pb—; los tres últimos, como ya se ha indicado, son los productos finales de series radiactivas que empezaron con el uranio y el torio. Puesto que cada yacimiento de plomo tiene una historia distinta —dependiendo de la época en que se formó y de cuál fue la composición inicial de plomo, uranio y torio— se han descubierto diferentes composiciones isotópicas del plomo en los distintos yacimientos. Las diferencias en la composición isotópica se caracterizan mediante tres números —^{206}Pb/^{204}Pb, ^{207}Pb/^{204}Pb y ^{208}Pb/^{204}Pb—, específicos para cada yacimiento. A veces, para facilitar el manejo de estos tres números se utiliza un



M. ELICES Y J. M. MARTINEZ

3. EL ENVEJECIMIENTO del ^{14}C nos ha permitido fechar el gran techo de los bisontes polícromos en la cueva de Altamira. Un grupo de cazadores recolectores se instalaron en ella, hace 14.500 años, y nos legaron una maravilla del arte cuaternario.

algoritmo con ellos y se obtiene el llamado *índice de relación isotópica*. Aunque es posible que por este procedimiento varios yacimientos tengan el mismo índice, no resulta muy probable que esto suceda y se simplifica bastante la comparación de los resultados al usar un solo número en vez de tres.

La procedencia del pigmento blanco más empleado en la pintura —el albayalde— nos ilustra el interés de la aplicación del índice isotópico del plomo. El albayalde es un carbonato de plomo muy apreciado por su color blanco y capacidad de cubrición; los pintores lo han incorporado a su paleta desde hace más de mil años. Durante el período que va desde 1600 hasta 1800, prácticamente todo el albayalde consumido en Europa provenía de unas minas inglesas y, por lo tanto, tenía un índice isotópico muy bien definido (entre 18,20 y 18,42).

El famoso cuadro "La familia Gerbier", pintado por Rubens, está formado por una gran tela rectangular central a la que se han añadido bandas laterales cosidas. Durante algún tiempo se tuvieron dudas sobre la autenticidad de las pinturas laterales, pero el análisis isotópico del plomo del albayalde las ha disipado. Los 14 análisis, procedentes de muestras de las distintas partes del lienzo, han proporcionado el mismo índice isotópico que corresponde al "período inglés" del albayalde.

Todos los ejemplos comentados se refieren a materiales que envejecen en condiciones que podríamos llamar asépticas. Exceptuando los materiales radiactivos, sólo hemos permitido que la temperatura y la tensión —elementos casi ubicuos en el entorno de los materiales— se confabulen con el tiempo. El envejecimiento es siempre un viaje hacia el equilibrio perdido, a veces en el mismo instante del nacimiento.

Velocidad de envejecimiento

La duración de este viaje varía mucho de un material a otro, desde tiempos inimaginablemente cortos para algunos materiales radiactivos hasta eones para los diamantes. Pero, ¿es verdad que los diamantes son para la eternidad? Se sabe que el diamante es un cristal de carbono y que la estructura estable de los cristales de carbono a la temperatura ambiente y presión atmosférica no es la del diamante, sino la del grafito. Entonces, ¿por qué no se han transformado en grafito —por qué no han envejecido— todavía todos los diamantes?

No se produce inmediatamente dicho cambio porque se requiere una energía de activación. Si calentáramos los diamantes a 2000 ºC, se transformarían muy pronto en grafito. Los diamantes, en condiciones ambientales, son cristales congelados. Aunque no se conocen bien los detalles de la generación de los diamantes en el interior de la Tierra, se supone que se forman a temperaturas por encima de 1500 ºC y presiones superiores a 6000 MPa, condiciones que se dan a más de 200 km de profundidad. En algún momento los diamantes han sido transportados a la superficie con las rocas volcánicas, y esta ascensión debió ser muy rápida, en pocas horas o quizás en menos tiempo. Así se evitó que llegaran al equilibrio con el entorno y que se convirtieran en grafito.

La observación geológica corrobora la teoría. Se han descubierto depósitos muy ricos de lo que podrían haber sido diamantes, pero que, en la actualidad, sólo son masas de grafito porque tardaron demasiado en surgir. La edad de los diamantes que han sobrevivido a este viaje infernal se puede estimar a partir de las inclusiones que contienen. Estas inclusiones, al quedar aisladas dentro de los diamantes, pueden datarse mediante técnicas radiactivas. Los valores obtenidos nos revelan una extraordinaria longevidad: se han medido edades que van desde los 100 millones de años hasta los 3000 millones de años.

Estas gemas han permanecido guardadas en las rocas volcánicas que han aflorado y se han enfriado en la superficie de la Tierra. Tras millones de años, el viento y las inclemencias del tiempo, lentamente, grano a grano, han erosionado las rocas y, de vez en cuando, han liberado pequeñas y duras joyas que el agua ha arrastrado hasta el cauce de un río o las orillas de una lejana playa.

Los ejemplos aducidos nos han servido para ilustrar el envejecimiento de materiales en ambientes que se pueden considerar inertes. Pero el envejecimiento puede acelerarse si cooperan con el tiempo otros agentes agresivos.

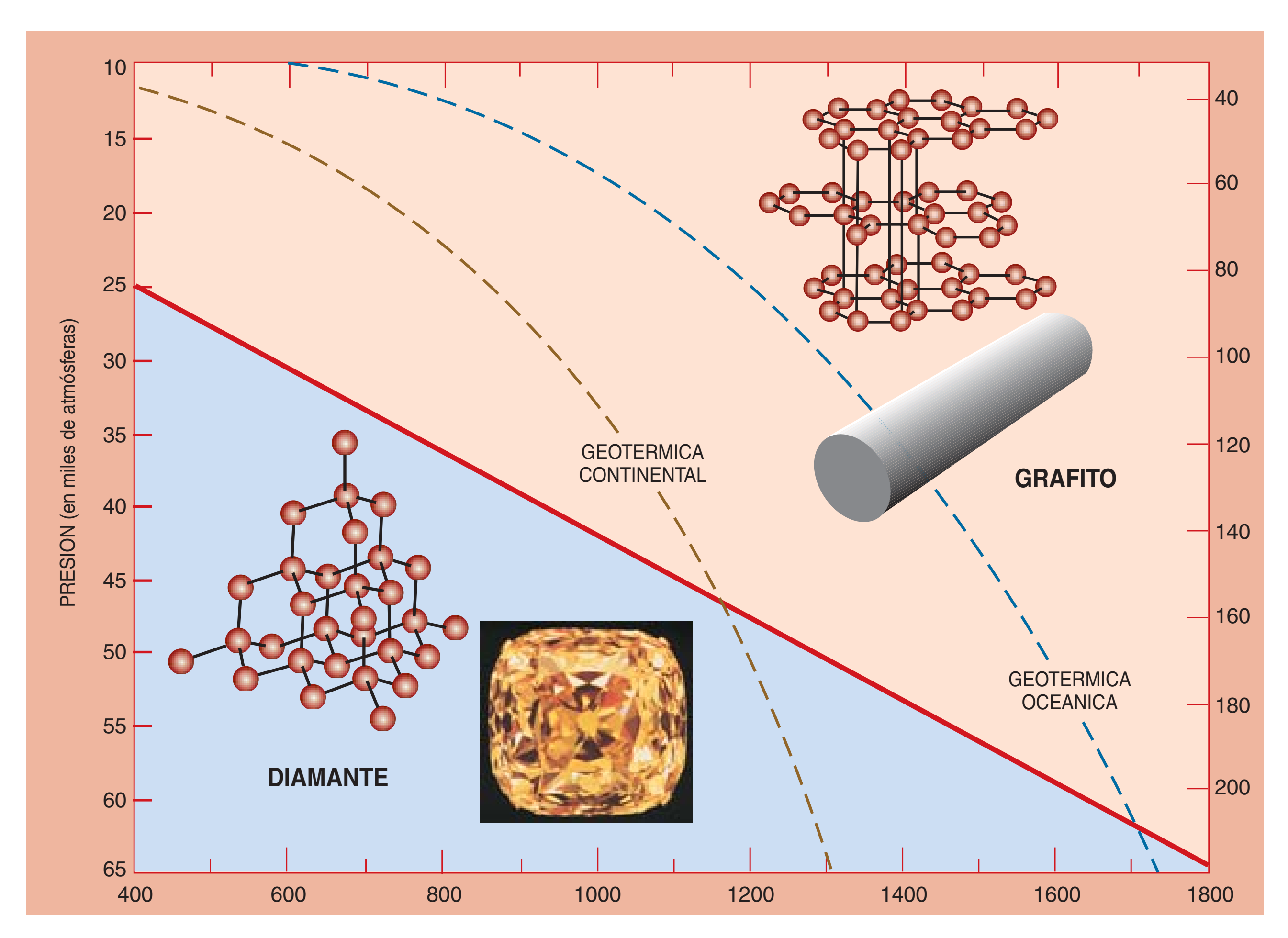
Las amenazas del exterior

Las obras de arte de porcelana acostumbran alcanzar precios muy elevados en las subastas. A nadie debe extrañar que los falsificadores se esmeren en plagiarlas. Aunque los anticuarios avezados conocen bien los estilos y los esmaltes, los imitadores los engañan de vez en cuando. Por este motivo es cada vez más frecuente que las obras de arte de porcelana vayan acompañadas de un certificado de su edad. El paso del tiempo —la edad— en los materiales cerámicos se puede conocer a causa de una agresión que proviene del exterior —la radiación ionizante— mediante la técnica de la *termoluminiscencia*.

La datación mediante termoluminiscencia es, en esencia, una medida de la radiación a la que se ha expuesto el material cerámico desde que fue cocido. Cuando este material se calienta hasta 500 ºC emite una luz débil, aunque mensurable. Si se vuelve a calentar, el material sólo emite la radiación de cuerpo negro o de incandescencia. La luz extra emitida en el primer calentamiento es la termoluminiscencia. Esta luz procede de minerales de la cerámica sometidos a un flujo débil de radiación nuclear originado por impurezas radiactivas: potasio 40, torio y uranio. Se trata de isótopos radiactivos de vida media muy larga, de más de mil millones de años.

Durante el horneado se elimina la termoluminiscencia que habían adquirido los minerales a lo largo del tiempo geológico. Viene a ser como si se pusiera el reloj del material cerámico a cero. Por consiguiente, si además de la termoluminiscencia se mide la sensibilidad del material para adquirir termoluminiscencia (mediante una fuente calibrada de isótopos radiactivos) y la cantidad de radiactividad presente, se puede, en principio, descubrir la edad de la cerámica.

En la práctica, sin embargo, la datación por termoluminiscencia reviste cierta complejidad. Además,



4. DIAGRAMA PRESION-TEMPERATURA para las regiones estables del diamante y del grafito. Las dos curvas representan, de forma aproximada, la variación de la temperatura con la profundidad en el interior de la Tierra; los valores para regiones continentales difieren de los oceánicos. Se cree que los diamantes se forman por debajo de los 200 kilómetros, donde las presiones son del orden de 60.000 atmósferas y las temperaturas alrededor de 1500 ºC.

los falsificadores conocen esta técnica y tratan de engañar fabricando objetos con trozos auténticos de cerámica, donde suponen que se van a tomar las muestras (sólo décimas de gramo). Recientemente se descubrió una falsificación de un caballo de porcelana, atribuido a la dinastía Tang (618-907 d.C.). Las primeras medidas hechas en la peana del caballo mostraron la antigüedad adecuada, pero posteriores dataciones en el pescuezo y la cola del équido indicaron una porcelana más moderna. La falsificación se había hecho utilizando trozos de porcelana auténtica. Otras veces, los falsificadores tratan de burlar el test de la termoluminiscencia irradiando la cerámica, con lo que consiguen un envejecimiento acelerado.

Más antiguos que la cerámica

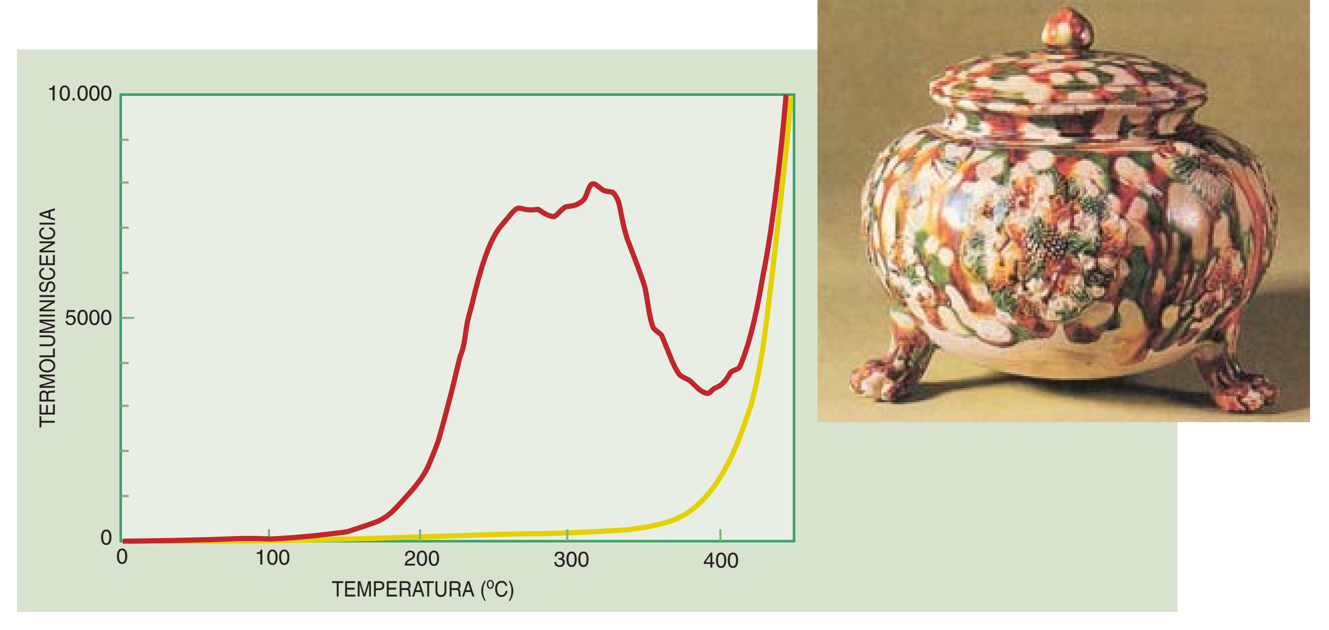
La cerámica apareció hace menos de 10.000 años. Ha sido en materiales más antiguos, del Paleolítico, donde la termoluminiscencia ha hecho sus contribuciones más interesantes. (Las dataciones con ^{14}C a duras penas alcanzan 40.000 años.)

Gracias a la termoluminiscencia podemos fechar también la edad de útiles de sílex, de ciertas piedras, estalactitas, estalagmitas y sedimentos. Hachas, puntas de flecha, raspadores y otros artefactos de sílex se calentaron accidentalmente o a propósito para "mejorar" sus propiedades. Ahí reside la clave para el técnico que debe fecharlos. Una forma de cocinar —en las culturas que no conocían la cerámica— consistía en mezclar los alimentos con piedras calientes. Con frecuencia, estas piedras no tenían un uso continuado porque se cuarteaban al enfriarse. En los lugares donde se aplicaba esta práctica abundan las piedras que pusieron su reloj a cero cuando las calentaron.

En las estalagmitas y estalactitas, en algunos sedimentos marinos y lacustres, loess, dunas de arena o en el polvo incorporado en el hielo de algunos glaciares, la termoluminiscencia es despreciable cuando empiezan a formarse; en estos materiales la medida de la termoluminiscencia sirve para conocer el tiempo transcurrido desde que se gestaron.

El paso del tiempo en los objetos sometidos a radiación produce efectos distintos según el tipo de material; se ha visto que en algunas cerámicas cristalinas la radiación aumenta su capacidad de luminiscencia y no parece mermar sus propiedades mecánicas; diríase que apenas envejecen. Los materiales metálicos

M. ELICES Y J. M. MARTINEZ



5. LUZ EMITIDA AL CALENTAR UN MATERIAL CERAMICO. La curva roja es la luz producida durante el primer calentamiento. La curva amarilla es la radiación de incandescencia. La luz extra emitida en el primer calentamiento se debe a la termoluminiscencia.

M. ELICES Y J. M. MARTINEZ

no exhiben luminiscencia; tampoco parece que envejezcan cuando soportan las radiaciones que podríamos llamar usuales. Otra cosa es cuando se utilizan en reactores nucleares o reciben un flujo intenso de neutrones, en cuyo caso pierden propiedades mecánicas y se fragilizan.

Los plásticos

Los polímeros orgánicos, más delicados, experimentan con la radiación solar una aceleración de su proceso de envejecimiento que se manifiesta, entre otras cosas, en la decoloración superficial —los transparentes, amarillean— y en una progresiva fragilización.

La causa del envejecimiento por radiación solar en los plásticos se debe a que la radiación puede romper enlaces químicos. La región del ultravioleta —que es más energética que la visible o la del infrarrojo— es la más perniciosa. La rotura de los enlaces origina radicales libres que pueden combinarse con el oxígeno, por ejemplo, o formar reticulaciones entre moléculas adyacentes. En la industria se aprovecha el efecto reticulante de las radiaciones para rigidizar plásticos blandos; en la fabricación de circuitos impresos se emplean polímeros fotosensibles que, al reticular, se insolubilizan y fijan al sustrato, protegiéndole del ataque químico cuando se efectúa el grabado del circuito.

El envejecimiento de los plásticos es un fenómeno ambivalente. Unas veces se desea y otras no. Cuando se quiere evitar, se adicionan pigmentos o cargas que absorban las radiaciones. Cuando se quiere fomentar, se incorporan aditivos que catalizan la fotodegradación. Los problemas que generan los residuos han potenciado la aparición en el mercado de materiales plásticos más fácilmente degradables.

Oxígeno contra el envejecimiento

Hay en Nueva Delhi una columna de hierro que se ha hecho famosa porque desafía, para asombro de metalúrgicos y arqueólogos, el paso del tiempo. Desde hace más de 1600 años se yergue, al aire libre, sin apenas señales de corrosión. Se trata de una auténtica rareza, porque el hierro a la intemperie y con el paso del tiempo acaba oxidándose. Pocas obras de los primeros artesanos herreros han sobrevivido hasta nuestros días; una de las más antiguas es una espada encontrada en la tumba de Tutankamón, un faraón de la XVIII dinastía (alrededor de 1350 a.C.).

Casi todas las menas del hierro son óxidos. La extracción del metal se basa en separarlo del oxígeno, por el que tiene una gran afinidad. El hierro, en presencia de oxígeno, tiende a recombinarse con él y con el paso del tiempo a formar óxidos de hierro, cerrándose su ciclo vital. En determinadas circunstancias, estos óxidos son compactos e impiden que la corrosión avance. Es muy probable que ésta sea la causa que retrase la oxidación de la columna de Nueva Delhi, donde se ha detectado una delgada película protectora de óxido, entre 50 y 500 milésimas de milímetro de espesor. Este mismo proceso —la aparición de una delgada capa de óxido protector— impide la corrosión del aluminio.

El oxígeno es un agente externo que acelera el envejecimiento de muchos materiales. El agua es otro. No obstante, se han encontrado barcos hundidos en el mar bastante bien conservados después de varios siglos. El mar ha sido la principal ruta de comunicación entre los continentes hasta el siglo XX, por cuya razón los pecios se han convertido en una valiosa fuente de información histórica; el barco y su contenido nos transportan al pasado y nos muestran cómo eran y cómo se utilizaban los materiales.

Resulta interesante observar que los materiales rescatados del fondo del mar suelen envejecer con mucha rapidez, debido a la oxidación y a otras reacciones químicas. Es frecuente que al recuperar bolas de cañón —hechas de fundición, una

aleación de hierro con alto contenido en carbono— se agrieten y desmoronen en pocas horas. A veces las reacciones que provoca la oxidación proceden con tal rapidez, que las bolas se calientan y, en algunos casos, se cuartean de forma explosiva.

Las rocas más antiguas que conocemos y muchos fósiles —donde parece que el tiempo se ha detenido— son materiales ricos en oxígeno. Todo parece indicar que los materiales ricos en oxígeno —los que lo incorporaron de forma estable desde su nacimiento— están destinados a tener una vida prolongada.

A lo largo de los años sesenta y setenta —decenios en que se desarrollaron las técnicas de datación basadas en la radiactividad— se manifestó un vivo interés por encontrar las rocas más antiguas de la Tierra. En ellas se fiaba para conocer las primeras etapas de nuestro planeta. En 1971 se descubrió en Isua, Groenlandia, un yacimiento de rocas sedimentarias de 3750 millones de años de antigüedad. Hay otro similar (3500 millones de años) en Barberon, Africa del Sur. Son areniscas ricas en cuarzo y granito (materiales oxigenados y durables); algunas muestran trazas de mareas, lo que indica que en aquellos tiempos ya existía la Luna, y hasta es posible que puedan corroborar que los días duraban entonces diez horas. Es más, estas areniscas se formaron muy probablemente a partir de la erosión de rocas continentales. ¿Un testimonio de los continentes primitivos?

Fosilización

La existencia de fósiles es una maravilla geológica. Al morir, un organismo se descompone rápidamente. Pero, a veces, una serie de acontecimientos hacen que su forma perdure en un fósil. En el proceso de fosilización se sustituyen por minerales los compuestos orgánicos; frecuentemente por carbonato cálcico, sílice y fosfato cálcico (todos ellos materiales oxigenados y durables). Los científicos dedicaron, ya en el siglo XIX, un encomiable esfuerzo a la recolección y clasificación de fósiles. Pronto se dieron cuenta de que muchas formas de vida —mostradas en los fósiles— no existían en la actualidad, si bien hallaron una continuidad de rasgos a lo largo del tiempo (geológico), que se convirtió en el aval más sólido de la teoría de la evolución.

Las formas de los organismos más antiguos —alrededor de 2000 millones de años y parecidos a las bacterias— nos han llegado gracias a fósiles silíceos, un material oxigenado por el que, al parecer, no pasa el tiempo. Los fósiles más antiguos de organismos *multicelulares* se encontraron a mediados del siglo XX en rocas de finales del Precámbrico —alrededor de 600 millones de años—, pertenecientes a la fauna de Ediacara (los primeros se descubrieron en Ediacara Hills, Australia). Eran animales marinos —parecidos a medusas, corales y anélidos— cuyas formas blandas se han conservado al enterrarse en arena fina. La longevidad de los materiales con los que se han producido los fósiles nos permite estudiar el legado de nuestros precursores.

Materiales artificiales

El hormigón es otro material oxigenado y, por lo tanto, previsiblemente duradero. Conviene citarlo, aunque sea brevemente, porque se trata de un material fabricado artificialmente y puede servir de preámbulo a los materiales creados por seres vivos.

El hormigón envejece porque sus componentes inestables tienden al equilibrio, porque sufre agresiones del medio externo y porque con el tiempo afloran los defectos contraídos durante su gestación y nacimiento. Una fabricación inadecuada, por ejemplo una relación agua/cemento incorrecta, puede engendrar un hormigón poroso más susceptible a la agresión de agentes externos; carbonatación debida al dióxido de carbono o al ataque de sulfatos.

En otros casos, el envejecimiento precoz del hormigón se debe a la presencia de ciertos materiales utilizados en su preparación; los hormigones que tienen un alto contenido en álcalis pueden reaccionar con los áridos silíceos y producir una expansión y agrietamiento. Los hormigones fabricados con cementos con un alto contenido en alúmina —desarrollados en Francia a comienzos del siglo XX para resistir la agresión de las aguas en terrenos yesíferos— poseen altas resistencias a muy tiernas edades y resultan muy útiles para la industria del hormigón prefabricado. Con el paso del tiempo, se observó que los productos de la hidratación de estos cementos eran porosos y, en consecuencia, los hormigones ofrecían menos resistencia y se volvían más



SERGIO RODRIGUEZ, POR GENTILEZA DEL MUSEO DE CIENCIAS NATURALES DE ADELAIDA

6. LOS FOSILES SON UNA MARAVILLA GEOLOGICA. En el proceso de fosilización los compuestos orgánicos son reemplazados por minerales; frecuentemente por carbonato cálcico, sílice y fosfato cálcico. Todos ellos materiales en los que parece que el tiempo se ha detenido. Este es un ejemplar de *Charniodicus* perteneciente a la fauna de Ediacara de la región de los Flinders Range de Australia.

sensibles a las agresiones externas. La hidratación, que favorece el envejecimiento del hormigón, es muy lenta a temperaturas por debajo de 15 ºC, pero se acelera con temperaturas altas y con la humedad.

Hemos visto que la radiación, el oxígeno y otras agresiones del exterior pueden acelerar el envejecimiento y, en algunos casos, provocan la muerte de los materiales. No todos los materiales muestran una actitud pasiva, como los considerados hasta ahora. Hay materiales activos que pelean por sobrevivir, mantener su juventud o, cuando menos, prolongar su vida.

La eterna juventud

Algunos árboles aparentan gozar de eterna juventud. El pino que vive en el inhóspito paraje californiano de White Mountains (*Pinus aristata*) parece estar allí desde siempre. Cuando se ha intentado estimar la edad de estos árboles —midiendo los anillos de crecimiento— se han observado ejemplares con más de 4000 años.

La madera de los árboles merece una breve incursión por dos aspectos, al menos. En primer lugar, porque se trata de un material activo, que se renueva en busca de la juventud (los materiales considerados hasta aquí eran pasivos; soportaban, mejor o peor, las amenazas del exterior pero no se regeneraban). En segundo lugar, porque registra ostentosamente el paso del tiempo y nos ofrece un calendario natural para fechar eventos.

En un árbol vivo, la madera —además de la función resistente— permite el transporte del agua, desde la raíz hasta las hojas, y el almacenamiento de substancias de reserva. Las células que realizan las funciones resistentes y de transporte son células muertas, mientras que las responsables del almacenamiento están vivas y duran muchos años, según la especie de árbol.

Al observar la sección del tronco distinguimos la corteza, la albura (zona clara, de donde el nombre) y el duramen (más oscura). La madera se genera a partir del cámbium, fina capa sita entre la corteza y la albura. La actividad del cámbium no es constante a lo largo del año; permanece latente durante la época fría y se activa —creando nuevas células— a la llegada de la primavera. En esta estación se forma una capa menos densa y de un color más claro que la producida en verano, donde las paredes de las células son más gruesas. El contraste entre las maderas de primavera y verano se hace fácilmente visible y da lugar a los llamados *anillos de crecimiento* que, en climas no tropicales, son anuales.

La relación entre las densidades de la madera de verano y de primavera es alta en las coníferas; alrededor de 2,3. A esta desigualdad, que se traduce en una diferencia de durezas, se atribuye la aparición de superficies rugosas en puertas y ventanas que han envejecido por el desgaste y la erosión. Con el paso del tiempo, los anillos más internos de la albura van perdiendo su actividad vital, oscurecen y mueren; así se forma el duramen. La misión de esta región central sólo es resistente; ésa es la razón de que puedan verse árboles vivos con su interior hueco por la pudrición del duramen. Si la madera está bien protegida puede durar mucho tiempo. (En yacimientos de lignitos se han encontrado restos de madera de más de 10 millones de años; aunque su aspecto era negruzco, estaba bien conservada y todavía se podía trabajar con garlopa.)

Los anillos de crecimiento son la base de un método de datación —llamado *dendrocronología*— que no tiene rival en precisión. Detecta aspectos del pasado con una resolución anual. El espesor de cada anillo depende del clima de cada año, principalmente de la cantidad de precipitación y de la temperatura en primavera y verano. Por tanto, en el espesor de cada anillo se nos ofrece una huella anual del clima durante el período de crecimiento. Esta información se registra en un gráfico donde se indica la anchura del anillo en función del año; con los gráficos obtenidos podemos correlacionar los datos entre distintos árboles y justificar la hipótesis básica de la dendrocronología: todos los árboles de la misma especie que han crecido en un área con idéntica climatología exhiben el mismo gráfico de anillos de crecimiento.

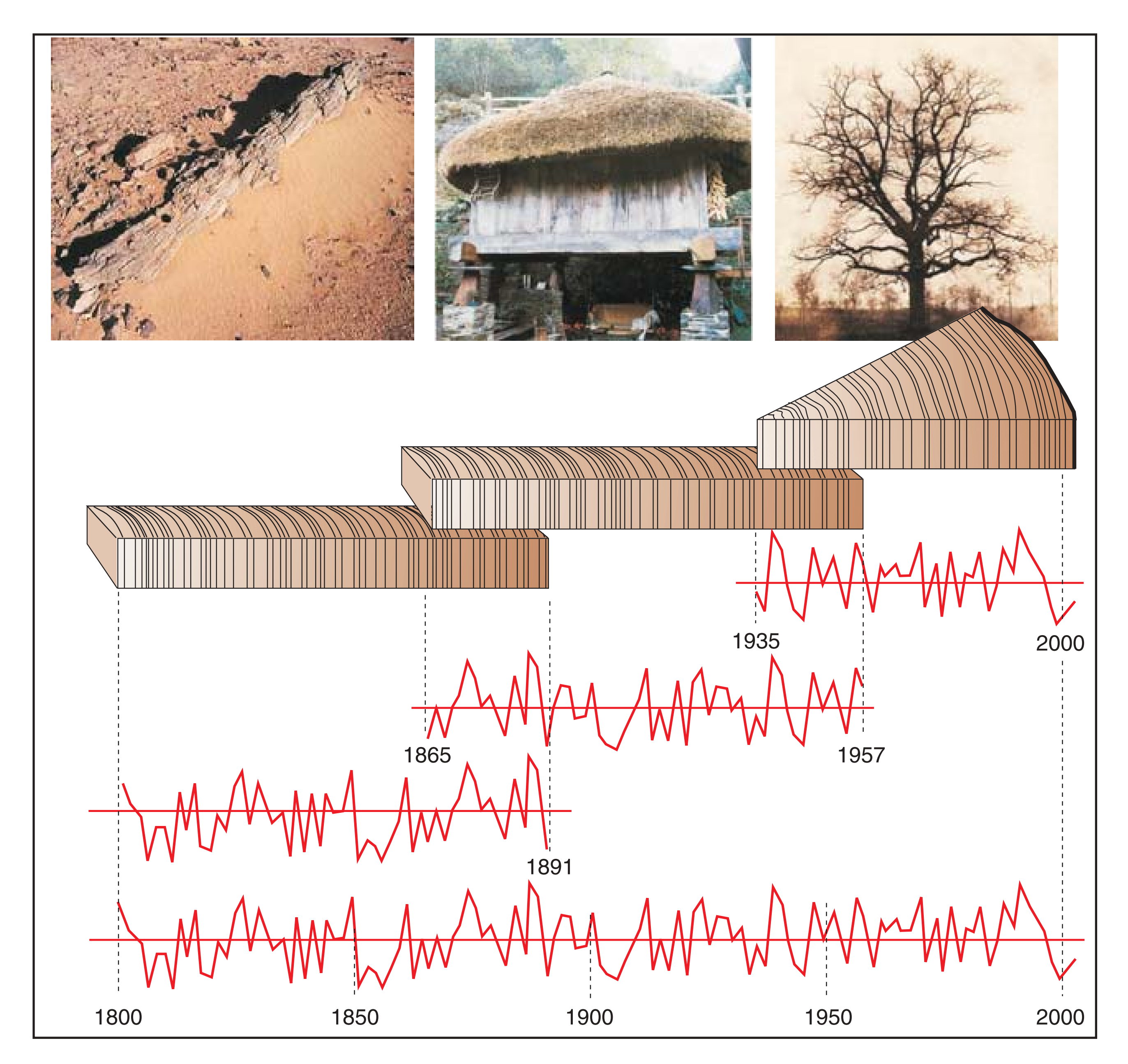
La correlación entre distintas muestras de madera no es trivial. Se requiere el solapamiento de una cincuentena de anillos para obtener resultados fiables. Solapando gráficos de maderas de diversas edades, incluso madera fósil, se han construido gráficos "patrón" para varios tipos de madera en diversas regiones. El roble y el pino son los árboles más adecuados para Europa central y occidental. A partir de más de 600 gráficos de robles se ha construido la curva patrón *Hohenheim* para la región alemana. En ella se han registrado —sin interrupción— 9928 anillos y permite dataciones hasta 7938 a.C. Análogamente, a partir del pino de la especie *P. aristata* se han construido curvas patrón en América del Norte que posibilitan dataciones hasta el Holoceno.

Observando los anillos de crecimiento de estos pinos



7. AL OBSERVAR LA SECCION DE UN TRONCO se puede distinguir la corteza, la albura y el duramen. La madera se genera a partir de una fina capa, llamada cámbium, situada entre la corteza y la albura. El cámbium permanece latente durante la época fría y se activa en primavera y verano. El contraste entre las maderas de primavera y verano es visible y origina los anillos de crecimiento.

CARLOS GRACIA



californianos, La Marche advirtió, en los años setenta, una rara coincidencia; notó que algunos anillos estaban dañados por las heladas y que eran especialmente notables las lesiones sufridas en 1884, 1912 y 1965. Curiosamente, estas fechas coincidían con grandes erupciones volcánicas: Krakatoa (1883), Katmai (1912) y Agung (1963). La Marche sospechó que sus pinos habían registrado los efectos climáticos de las erupciones, pero el artículo donde expuso sus resultados tuvo poca resonancia hasta la publicación de otro, por Hammer y colaboradores, en 1980. En este último, basado en la información suministrada por testigos de hielo extraídos en Groenlandia, se indicaba una posible erupción volcánica en la edad del Bronce (1390 ± 50 a.C.).

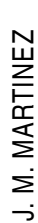
8. LOS ANILLOS DE CRECIMIENTO DE LA MADERA son la base de la dendrocronología. El espesor de cada anillo es una huella anual del clima y esta información se registra en forma de un gráfico donde se indica la anchura del anillo en función del año. Los gráficos permiten correlacionar los datos entre distintos árboles y construir gráficos "patrón" para diversas regiones y tipos de árbol.

El acontecimiento despertó el interés de los arqueólogos. Se supuso que podía ser la erupción de Santorini, una isla del mar Egeo. De ser cierto, habría sucedido en un área con una cultura muy desarrollada. ¿Cuándo se produjo la erupción? ¿Coincidió quizá con el ocaso de la civilización minoica? Esta cultura prosperó en la isla de Creta, situada a unos 100 km al sur de Santorini. Las fechas más aceptadas del fin de la civilización minoica —basadas en la cronología egipcia— lo situaban entre 1450 y 1500 a.C, pero la datación radiocarbónica sugería períodos anteriores, alrededor de 1650 a.C.; por su parte, el testigo de hielo indicaba épocas más recientes (1390 a. C.). El escenario para una acción detectivesca estaba preparado.

M. ELICES Y J. M. MARTINEZ



9. EL COLAGENO es un componente esencial de la piel. Es un material activo que lucha contra el paso del tiempo. Los radicales libres y la glicosilación influyen en la elasticidad de la piel y en la aparición de las arrugas.



La dendrocronología y un nuevo testigo de hielo pueden haber zanjado la polémica. En 1984 se cotejaron los anillos de los pinos de California con series de anillos de robles de Irlanda y de Alemania, observando una buena coincidencia (escasez de anillos o anillos muy finos) en un intervalo de unos pocos años a partir de 1628 a. C. Parecía claro que no se trataba de un suceso local de California y que, más bien, era un fenómeno global. El mejor candidato era la erupción de Santorini. Esta hipótesis se reforzó cuando en 1987 se analizó otro testigo de hielo de Groenlandia y se identificó una capa ácida correspondiente a 1645 ± 20 a. C. Los anillos de la madera proporcionaron la técnica de datación más precisa, 1627 o 1628 a. C.

Colágeno

El colágeno —la proteína fibrosa que más abunda en el tejido conjuntivo— nos ofrece otro ejemplo de un material activo que lucha por retardar los efectos implacables del tiempo. El colágeno es el material básico de los tendones, ligamentos y cartílagos. Constituye también un componente esencial de los huesos, dientes, piel, arterias y venas.

Corresponde al colágeno mantener los órganos en su sitio y dictar la forma externa de nuestro cuerpo. Su importancia se pone de manifiesto cuando —con el paso del tiempo— envejece. Los tendones y ligamentos, de un color blanco brillante en los niños, amarillean con la edad. El colágeno de color dorado es más tenaz pero menos flexible que el colágeno joven; a su envejecimiento, entre otras causas, se debe la rigidización de las articulaciones y de los pulmones con la edad.

El colágeno es un material activo que lucha contra el paso del tiempo y trata de mantenerse joven reparando, hasta cierto punto, las agresiones del exterior. Sabido es que el oxígeno y la glucosa —imprescindibles para el metabolismo— tienen aspectos negativos que contribuyen al envejecimiento. Necesitamos oxígeno para quemar nuestro combustible, pero, al utilizarlo, se crean subproductos peligrosos — radicales libres— que dañan al colágeno. La radiación ultravioleta también puede activar el oxígeno y estimular la síntesis de colagenasa —una enzima que degrada el colágeno— perturbando el equilibrio normal colagenasa/anticolagenasa. En la piel, por ejemplo, todo ello ocasiona una distensibilidad inusual.

La glucosa, fuente de energía, provoca efectos indeseables cuando su nivel supera cierto umbral. En los diabéticos los tejidos ricos en colágeno se rigidizan y amarillean más deprisa. Se cree que esta debilidad resulta de la glicosilación (AGE, *advanced glycosilation end products*, el acrónimo tiene una connotación —edad, envejecer— oportuna en lengua inglesa), proceso que facilita la unión irreversible de la glucosa a las proteínas, impidiendo su funcionamiento normal. Los AGE, muy reactivos, forman enlaces transversales con moléculas de colágeno. A estas uniones irreversibles se deben las arrugas de la piel.

Veamos, con un poco más de detalle, cómo influye el paso del tiempo en los tendones, donde el material básico es el colágeno. La misión de los tendones es conectar el músculo al hueso y pueden considerarse como un material compuesto reforzado con fibras; la matriz es un gel de proteoglicano hidratado y el refuerzo son fibrillas de colágeno.

Con el paso del tiempo, el colágeno se rigidiza por la formación de más enlaces transversales entre las moléculas de tropocolágeno y también debido a los AGE. En esa pérdida de flexibilidad se esconde la causa de las roturas de tendones en atletas de cierta edad. Por el contrario, si no se forman suficientes enlaces entre las moléculas de tropocolágeno, los tendones se debilitan. Se sabe que, para construir estos enlaces, se precisa transformar los residuos de prolina y lisina en hidroxiprolina e hidroxilisina, que ya son capaces de establecer entre ellos enlaces covalentes. Para este proceso se requiere la presencia de una enzima, hierro, oxígeno y vitamina C. A la falta de formación de dichos enlaces transversales en el colágeno se debía la temida enfermedad del escorbuto, azote de la marinería. Se solucionó de forma empírica, a mediados del siglo XVIII, al añadir en la dieta vitamina C.

Igual que en los materiales metálicos, los tendones también experimentan el fenómeno de la fatiga mecánica cuando se someten repe-

tidamente a fuerzas de baja intensidad. El colágeno puede, hasta cierto punto, reparar esos microtraumas, pero con el tiempo disminuye su capacidad porque se reduce el metabolismo y la vascularización de los tendones.

Racemización de los aminoácidos

El flujo del tiempo a través de los materiales no sólo causa envejecimiento, sino que constituye también un reloj que nos indica su edad. Lo hemos visto en materiales inertes. Cabe esperar que, con más razón, también suceda en materiales vivos. La racemización —que explicaremos enseguida— de los aminoácidos presentes en los materiales vivos es un fenómeno que puede servir para datarlos. Para ilustrarlo volvamos al colágeno y a la madera.

Los aminoácidos, componentes básicos de las proteínas, pueden presentarse de dos formas, imagen especular una de la otra, como las manos (de ahí su denominación de formas quirales); ambas tienen la misma composición química y estructuras similares, aunque no superponibles. Las dos configuraciones del aminoácido se llaman L (levógira) y D (dextrógira); en la mayoría de los aminoácidos de las proteínas de los organismos predomina la configuración levógira. Se trata, claramente, de una situación desequilibrada que se mantiene porque el material está vivo. Al morir y con el paso del tiempo se alcanza el equilibrio entre las dos configuraciones, debido a las reacciones que transforman L en D y viceversa. Este proceso de transformación se llama *racemización*. (El nombre proviene del ácido racémico —un subproducto de la fermentación de la uva (*racemus*)— que en 1844 estimuló el estudio de las estructuras quirales.) En principio, si se conoce la velocidad de racemización y se mide la proporción entre las configuraciones L y D, se puede calcular el tiempo transcurrido desde el inicio del proceso.

El comienzo de la racemización difiere de unos materiales a otros porque los aminoácidos quedan aislados en los materiales biológicos en distintas etapas de la vida. En los dientes, por ejemplo, los aminoácidos racemizan cuando la pieza está totalmente formada. Los aminoácidos de los huesos, por el contrario, inician el proceso de racemización cuando el hueso ya no intercambia fluidos con el resto del cuerpo, hecho que suele suceder con la muerte del organismo. Los aminoácidos de las conchas de los moluscos y de las cáscaras de los huevos empiezan a racemizar en el momento del desarrollo de los caparazones.

Alrededor del 30 % en peso del hueso (excluyendo el agua) es materia orgánica y el 90 % de ella, colágeno. Los aminoácidos del colágeno permiten dataciones basadas en la racemización; en particular, el ácido aspártico y la isoleucina. Como cada uno presenta una vida media distinta, el colágeno suministra un intervalo amplio de fechas; el ácido aspártico posibilita dataciones de hasta 100.000 años, mientras que con la isoleucina se alcanza el millón de años, el límite de esta técnica, ya que raramente se encuentra colágeno en materiales tan antiguos.

Aunque el componente principal de la madera sea la celulosa, aparecen otros constituyentes orgánicos complejos, incluidos aminoácidos que permiten datarla basándose en la racemización. Se trata, sin embargo, de un proceso que cursa en la madera más despacio que en los huesos. Se ha encontrado un buen acuerdo entre el grado de racemización del ácido aspártico y la edad geológica de muestras de madera fósil, procedente de Alaska, que se han conservado en buenas condiciones.

Los materiales biológicos pueden ser una fuente de inspiración para el diseño de nuevos materiales, porque a través de millones de años han aprendido a luchar contra el tiempo y a defenderse de las agresiones externas. Los materiales que se diseñen en el futuro no tienen por qué seguir siendo mudos, ciegos o sordos, ni permanecer pasivos frente a los ataques del exterior. Los nuevos materiales —de forma parecida a los seres vivos— deberían ser capaces de sentir, interpretar el significado de las sensaciones y obrar en consecuencia. Los materiales del futuro podrán sentir la angustia por el envejecimiento progresivo y el dolor por las agresiones, intentarán reparar los daños y gritarán para pedir ayuda cuando no puedan valerse por sí mismos.

Conclusión

No hemos aclarado si el sonido de las campanas mejora con el tiempo. Se sabe que el material ideal es el bronce por su dureza, baja velocidad de propagación del sonido y su débil capacidad de amortiguamiento. Los bronces utilizados en las campanas tienen la composición ideal; 78-80 % de cobre, 20-22 % de estaño y una cantidad de impurezas menor del 2 %. A diferencia del aluminio, el bronce no endurece por envejecimiento, ni sus constantes elásticas varían con el tiempo.

El sonido de las campanas, aparte de sus resonancias simbólicas, es complejo. En una campana afinada se pueden distinguir varios modos de vibración; el fundamental, el nominal (una octava más alto), el bajo (una octava más bajo) y otros modos. El oído identifica el tono fundamental en la mayoría de las personas, pero en otras es el nominal el que detecta. Además, a medida que el sonido decae, los tonos se van perdiendo; el bajo es el que más persiste. Todo ello hace que el sonido que percibimos tenga un componente subjetivo. Si añadimos que, con la edad, merma nuestra capacidad auditiva, con distinta intensidad para los diversos tonos, el sonido de las campanas nos parecerá distinto con el paso del tiempo. ¿Acaso no seremos nosotros, al envejecer y mezclar sentimientos afectivos, los que nos hacemos la ilusión de que el sonido de las campanas mejora con el tiempo?

Bibliografía complementaria

MADE TO MEASURE: NEW MATERIALS FOR THE 21ST CENTURY. P. Ball. Princeton University Press, 1997.

STRUCTURAL BIOLOGICAL MATERIALS: DESIGN AND STRUCTURE-PROPERTY RELATIONSHIPS. Dirigido por M. Elices. Elsevier, 2000.

THE COMING OF MATERIALS SCIENCE. R. W. Cahn. Pergamon Press, 2001.

¿Varían las constantes?

Dos constantes fundamentales de la física parecen haber variado en el transcurso de la historia del universo. Estas observaciones reabren un viejo debate sobre la naturaleza de las leyes físicas

Jean-Philippe Uzan

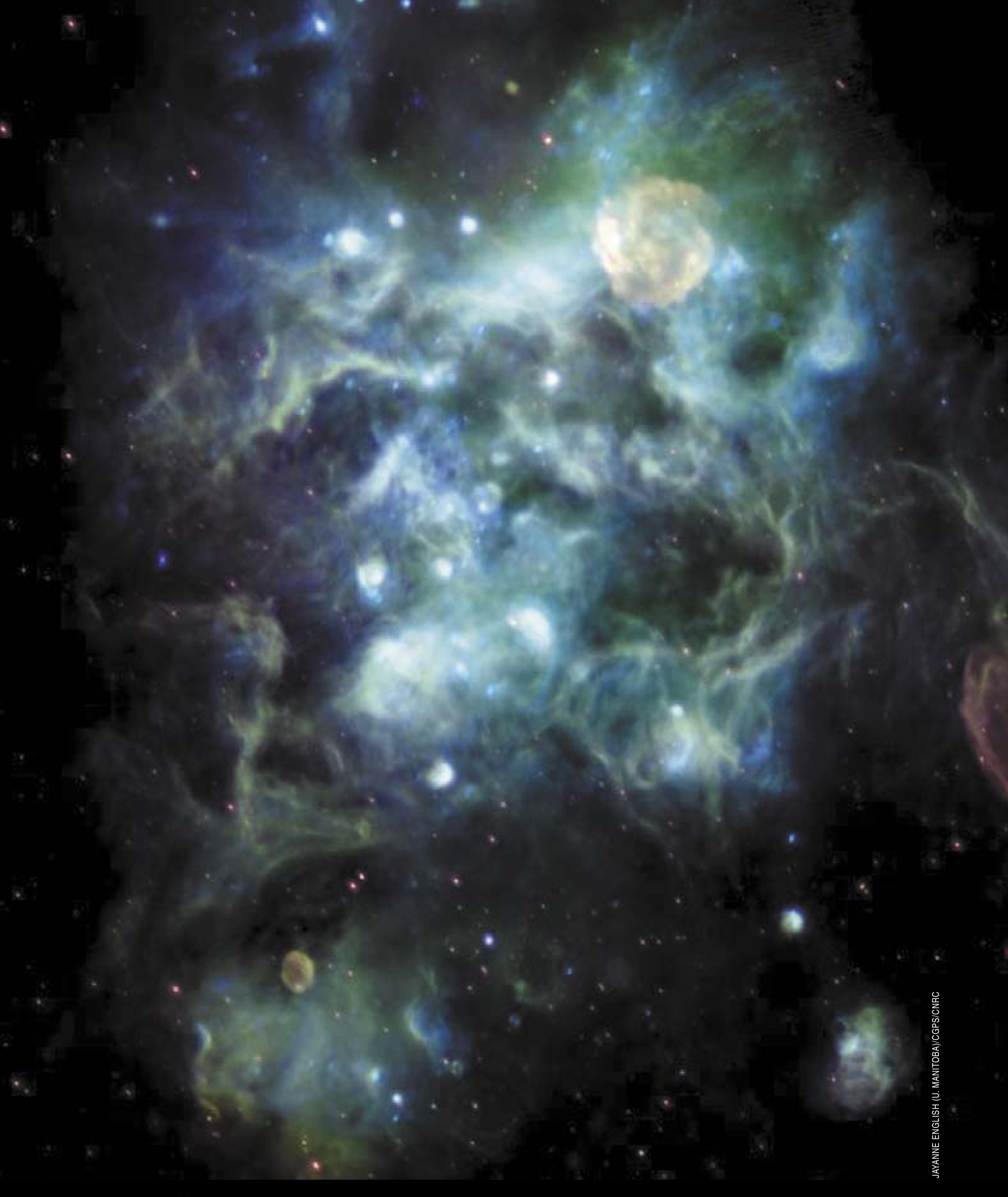
Cree la mayoría de los físicos que todos los electrones del universo, sin excepción, poseen exactamente la misma masa, la misma carga y el mismo espín. Así enunciada, esta afirmación podría pasar por una profesión de fe. En realidad, se halla implícita en la misma práctica científica, ampliamente justificada por sus innegables éxitos. Cuando los físicos reproducen o comparan experimentos para poner a prueba las leyes de la naturaleza, tienen que suponer que son idénticas en todo lugar y en toda época. Esta suposición suele recibir el nombre de principio copernicano, ya que nos recuerda que no justificaríamos *a posteriori* el resultado de un experimento sólo con la pretensión de que ocupamos un lugar privilegiado en el universo. Esta visión se opone a la de Aristóteles, para quien las leyes terrestres, aunque inmutables e idénticas en toda la Tierra, difieren de las celestes. El principio copernicano está hoy en el centro de numerosos debates teóricos. Los éxitos de la física y la astronomía modernas muestran que es difícil pensar en unas leyes físicas cuya estructura tomase formas diferentes en puntos diferentes del universo. En cambio, una variación lenta de las constantes fundamentales que intervienen en esas leyes es imaginable sin tener que volver a someter a juicio lo esencial de los resultados ya conseguidos. Si ignoramos esta posibilidad, nos arriesgamos a adoptar, sin saberlo, una visión falsa de nuestro universo. Por el contrario, si la tenemos en cuenta, puede que abramos un mirador a unas teorías físicas que, por ahora, no pueden comprobarse experimentalmente por otros medios. Así, la cuestión ha sido objeto de numerosos estudios teóricos y experimentales que tienen un punto en común: someten a las teorías de la gravitación a una prueba fundamental. Hace muy poco, un equipo de astrónomos anunciaba que la constante de estructura fina, una constante fundamental, ha variado a lo largo de la primera mitad de la historia del universo. Otro equipo publicó unos resultados que señalan una posible evolución de la relación entre las masas del protón y el electrón. Antes de ocuparnos de los aspectos más actuales de la busca de una variación de las constantes, comencemos recordando los términos de este ya viejo debate.

El autor

JEAN-PHILIPPE UZAN es investigador del Instituto de Astrofísica de París y del Laboratorio de Física Teórica de Orsay.

Se abre la caja de Pandora

En 1937, el físico Paul Dirac fue, con su hipótesis de los grandes números, el primero en considerar la posibilidad de que las constantes fundamentales varíen. Pensaba que, por razones estéticas, no deberían aparecer en las leyes de la naturaleza constantes numéricas ni muy grandes ni muy pequeñas. Desde luego, el valor numérico que atribuimos a ciertas constantes, por ejemplo la velocidad de la luz (299.792.458), se debe a los accidentes históricos que determinaron la definición de nuestras unidades de medida (aquí el segundo y el metro). Por tanto, la cuestión de Dirac sólo tiene sentido si nos liberamos de la arbitrariedad ligada a la elección de los patrones de medida: sólo cabe plantearla para cantidades adimensionales, como el cociente de la masa del protón y del electrón (que vale en torno a 1836 en todos los sistemas de unidades). Según Dirac, algunas de esas constantes, por ejemplo la razón de la fuerza eléctrica y la gravitatoria entre el protón y el electrón (del orden de 10^{40}), exhiben unos valores irrazonablemente altos. La advertencia expresaba un interrogante acerca del fundamento de nuestras leyes físicas, donde intervienen unas constantes cuyo valor no nos da la teoría, pero que debemos medir. ¿Son realmente fundamentales esas constantes (en cuyo caso, sólo podremos medirlas con experimentos) o algún día las explicará una teoría más general que aún ignoramos? En caso de que sea lo segundo, la

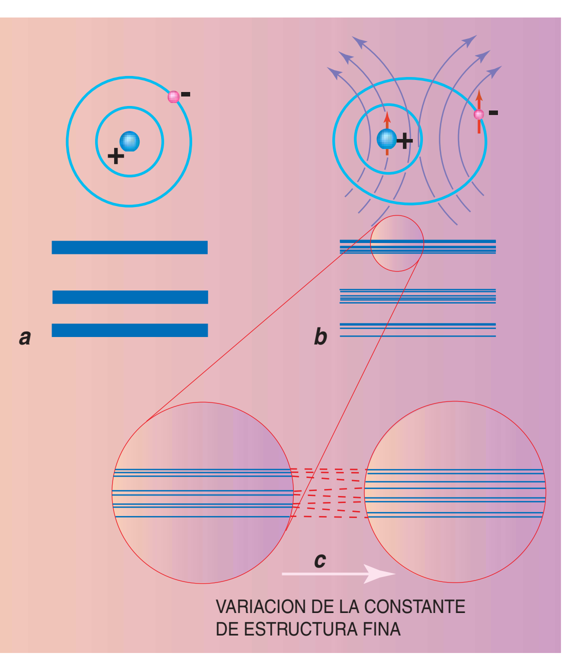


JAYANNE ENGLISH (U. MANITOBA)/CGPS/CNRC

1. EL UNIVERSO contiene nubes de gas (*azul y verde*); se nos muestran tal y como eran en otras épocas, tanto más remotas cuanto más lejanas estén las nubes. Además, hará unos 14.000 millones de años, el universo estaba poblado de cuásares (*puntos rojos*), núcleos activos de galaxias tan luminosos que son visibles a distancias del orden del radio del universo visible. Estudiando los cuásares, los astrónomos sondean el espacio-tiempo hasta llegar casi al 80 por ciento de la edad del universo. La luz de los cuásares es parcialmente absorbida por los átomos de las nubes de gas que encuentra a su paso; los correspondientes espectros de absorción nos informan sobre una posible evolución de las propiedades de los átomos en el curso de 14.000 millones de años.

experiencia pasada de los físicos los lleva a creer que esa nueva teoría revelaría unas relaciones sencillas y armoniosas entre las cosas; les cuesta imaginar que pudiesen caber en ella razones gigantescas entre dos aspectos de una realidad que, por otra parte, habría unificado.

Para buscar indicios de semejante teoría, Dirac recurrió a unos argumentos numerológicos algo dudosos y subrayó ciertas coincidencias. Así, en un átomo de hidrógeno, la razón de la fuerza eléctrica y la gravitatoria, que vale 10^{40}, es más o menos igual al número de vueltas dadas por el electrón alrededor del protón desde la gran explosión (Big Bang). Y algunos han señalado también que ese número es la raíz cuadrada del número de partículas contenidas en el universo observable... Dirac suponía que estas coincidencias no eran tales, que esas diferentes magnitudes estaban ligadas por una física todavía desconocida. Eso abriría la posibilidad de explicar, un día, los valores arbitrarios de las constantes numéricas: la intensidad de la fuerza gravitatoria sería, simplemente, proporcional a la de la fuerza eléctrica dividida por la edad del universo, con lo que el enorme valor presente del cociente de ambas fuerzas se debería sólo a la gran edad del cosmos. Esta hipótesis tiene como consecuencia que ciertas cantidades dimensionales que aparecen en la expresión de esos números adimensionales deberían variar con el tiempo; así, en el ejemplo propuesto, el cociente de la fuerza eléctrica y la gravitatoria ha de aumentar conforme envejece el universo. Según la teoría de Dirac, por lo tanto, la constante de la gravedad es proporcional a la inversa de la edad del universo. Asimismo, podría haber formulado Dirac la proporcionalidad de la carga del electrón con respecto a la inversa de la raíz cuadrada de la edad del universo.



2. EL ESPECTRO DE UN ATOMO manifiesta los niveles de energía de los electrones en órbita alrededor del núcleo (*a*). Esos niveles poseen una estructura fina (*b*) debida a efectos relativistas: un electrón en movimiento está sometido a un campo magnético, con el que interactúa por intermedio de su espín (que le confiere unas propiedades análogas a las de una aguja imanada). A esto se añade una estructura hiperfina debida a la interacción entre los espines del núcleo y de los electrones. Una variación de la constante de estructura fina produciría corrimientos de los niveles de energía correspondientes (*c*).

En el decenio de 1960 estas cuestiones adquirieron otro viso gracias a la formulación del "principio antrópico". Robert Dicke, de la Universidad de Princeton, y luego Brandon Carter, del Observatorio de París-Meudon, hicieron notar que la edad del universo medida por un observador no puede tomar un valor cualquiera: debe ser mayor que el tiempo necesario para que se formen las galaxias, las estrellas, los núcleos pesados... ¡todo ello imprescindible para que pueda existir un observador! Las coincidencias observadas por Dirac sólo reflejarían el efecto de la selección observacional expresado por el principio antrópico: la existencia de observadores en el universo es un hecho que impone restricciones a las leyes físicas y por ello al valor de las constantes.

Los primeros intentos de poner a prueba la teoría de Dirac manifestaron un gran ingenio. Consideremos, por ejemplo, el argumento propuesto, en 1948, por Edward Teller, padre de la bomba de hidrógeno. El Sol, señalaba, es una bola de gas en equilibrio: la gravitación tiende a hacer que se hunda sobre sí mismo por su propio peso, pero a ello se opone la energía generada en su interior y radiada hacia el exterior. La energía emitida por el Sol debe ser tanto mayor cuanto más intensa sea la fuerza gravitatoria. Más exactamente, Teller calculó que la energía radiada variaría con la séptima potencia de la constante de la gravedad si ésta evolucionase con el tiempo. Esto, a su vez, significa que la temperatura en la superficie de la Tierra variaría con la potencia 5/2 de esa misma constante.

Por consiguiente, si la constante de la gravedad hubiese disminuido con la inversa de la edad del universo en los últimos 200 o 300 millones de años, la temperatura media sobre la Tierra en el Cámbrico debería haber sido un 20 por ciento más alta que hoy; los trilobites, apenas aparecidos, se habrían cocido en el agua del mar. Peor, en el Precámbrico no habría habido océanos, pues la temperatura de la Tierra habría rebasado el punto de ebullición del agua. Más aún, el físico americano de origen ruso George Gamow señaló que, con tal derroche de energía, el Sol ya habría quemado sus reservas hace largo tiempo. Los físicos echaron entonces mano de todo (la formación de la Luna, la rotación de la Tierra, las dataciones geoquímicas, etc.) para salvar los inconvenientes. Por ejemplo, George Gamow demostró que su anterior razonamiento sobre la radiación solar podía contrarrestarse formulando la teoría de Dirac de modo que variase la carga del electrón y no la constante de la gravitación.

Constantes y metrología

Llegados a este punto, hay que señalar que cuando se pretende conferir un sentido preciso a la investigación de una variación en las constantes, surge una dificultad. La determinación experimental del valor de las constantes se apoya en la medida de longitudes, tiempos y frecuencias, es decir, en la comparación del sistema físico estudiado con otros sistemas considerados como patrones. Todo lo concerniente a la variación de las constantes está ligado a la elección de un sistema de unidades, o sea, a la metrología.

Primero, si las magnitudes de las que depende el material que constituye el aparato de medida varían en puntos diversos del espacio-tiempo, las propiedades del aparato variarán a su vez. De ahí que toda metrología dependa a la vez del espacio, del tiempo y del aparato de medida empleado. En consecuencia, no es posible medir directamente la variación de una constante dimensional, la masa del protón, por ejemplo. Esa masa deberemos compararla con un objeto que sirva de patrón, cuya masa dependerá de la masa del protón. A lo sumo, podremos, en principio, constatar la variación de una constante adimensional, así la razón de las masas del protón y el electrón.

Igual que, en la hipótesis de Dirac, una variación del cociente de la fuerza eléctrica y la fuerza gravitatoria indicaría una variación de la constante de la gravedad o de la carga del electrón, así también la variación de una constante adimensional podría interpretarse como la variación de una o de varias constantes dimensionales que entren en su expresión. Sin embargo, la elección de los sistemas físicos empleados para definir nuestras unidades tiene igualmente unas consecuencias en principio posibles de prever.

Tomemos el caso del metro en el sistema de medida internacional. Su definición a partir de una barra de platino iridiado depende del espacio interatómico de los metales empleados para construir la barra, espacio que, en primera aproximación, depende del radio atómico. Definido así el metro, no puede

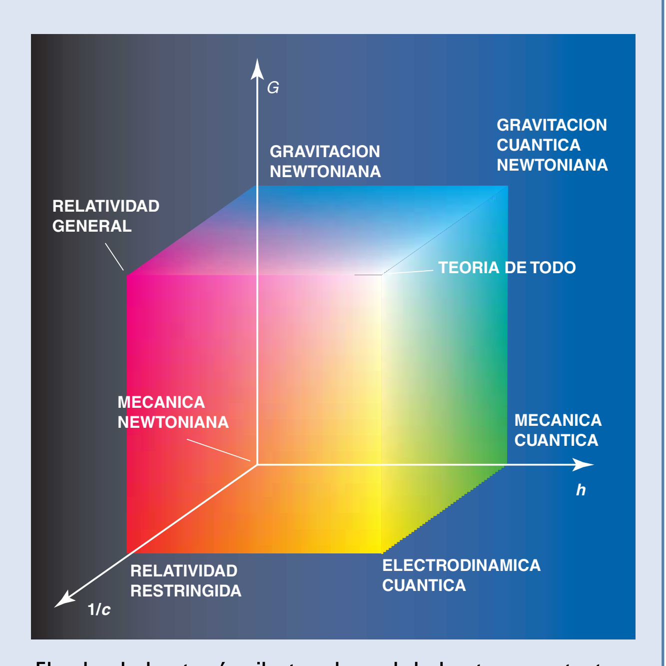
Tres unidades y tres constantes fundamentales

En el sistema internacional, las unidades fundamentales son el metro, el segundo y el kilogramo. Consideremos, por ejemplo, el caso de la energía, magnitud que antaño se expresaba de formas diversas. Gracias a la termodinámica, los físicos del siglo XIX aprendieron a relacionar la energía térmica, tal como se manifiesta, por ejemplo, en un gas caliente, con una cantidad de trabajo mecánico: ésta fue la invención propiamente dicha del concepto de energía. Desde entonces, el joule reemplazó a las demás unidades y nos desembarazó de inútiles coeficientes de conversión; así, en virtud de la ecuación $E_c = 1/2\, mv^2$, una masa de un kilogramo animada de una velocidad de un metro por segundo tiene una energía de un joule. Esto significa que la energía tiene las dimensiones de una masa, multiplicada por una longitud al cuadrado, dividida por un tiempo al cuadrado, es decir, que el joule no es sino el kilogramo metro al cuadrado por segundo al cuadrado.

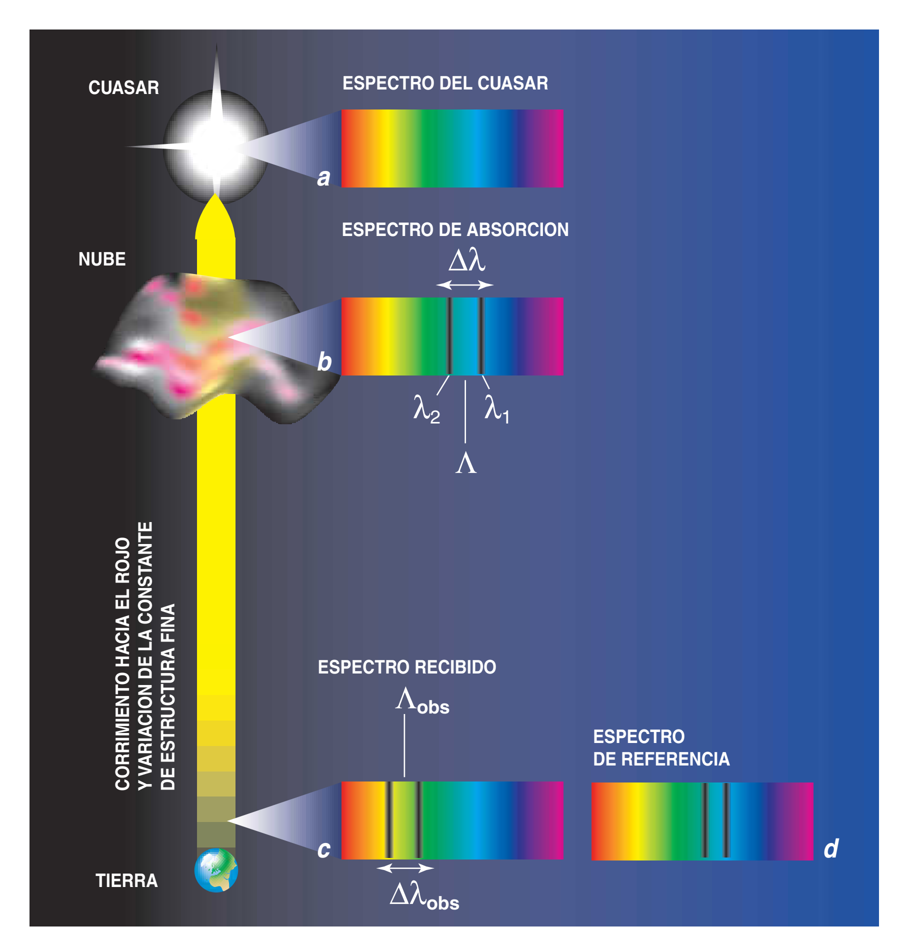
Lo mismo ocurre con la temperatura. Su unidad oficial es el kelvin. Sin embargo, la mecánica estadística nos enseña que la temperatura de un cuerpo representa la energía media de agitación de sus constituyentes. Con arreglo a esto, el coeficiente de proporcionalidad que permite pasar de joules a kelvin, la constante de Boltzmann k_B (unos 10^{-23} joules por kelvin), no tiene mayor significado que el coeficiente de 166,386 que permite pasar de euros a pesetas. La temperatura podría expresarse en joules, o sea, por medio de una masa, de una longitud y de un tiempo patrones.

Se persigue esta reducción para todas las demás unidades del sistema internacional. Cada avance de la física ha unificado dominios que parecían disjuntos. Magnitudes que podían creerse de naturaleza diferente se revelaron conmensurables y los números que las relacionan perdieron su categoría de constantes fundamentales para convertirse en simples factores de conversión. ¿Proseguirá esa tendencia? No lo sabemos. En estos momentos, subsisten tres magnitudes fundamentales (longitud, duración y masa), o sea, tres unidades. Igualmente subsisten tres constantes que parecen representar un papel más fundamental que las otras: la velocidad de la luz, c, la constante de Planck, h, y la constante de la gravitación, G. Si una teoría de las cuerdas constituye la etapa siguiente en la unificación de las leyes de la física, el número de constantes fundamentales se reduciría a dos: en esa teoría únicamente intervienen el tamaño de las cuerdas (del orden de 10^{-35} metros) y la velocidad de la luz. Ciertos físicos alimentan la esperanza de que podrá irse más lejos: en una futura teoría última, todas las constantes fundamentales se habrán reducido a simples factores de conversión.

Sin embargo, conviene mantenerse prudentes. Según la constante de que se prescinda, c, h o G, se obtienen leyes físicas que corresponden a secciones enteras de la realidad. Parece, pues, que la naturaleza está organizada alrededor de esas tres constantes, lo que excluye que un día se las pueda ignorar.



El cubo de las teorías ilustra el papel de las tres constantes "más" fundamentales. Según se le asigne a cada una un valor nulo o no nulo, se obtienen teorías que describen secciones enteras de la naturaleza.



3. LA LUZ DE UN CUASAR (*a*) atraviesa nubes de gas intergaláctico antes de llegar hasta nosotros. En esas nubes, los átomos absorben, conforme a sus propios niveles de energía, ciertas longitudes de onda. Se representa aquí una raya de longitud de onda Λ, dotada de una estructura fina cuyas componentes son λ_1 y λ_2 (*b*). El espectro recibido en la Tierra (*c*) puede ser diferente del producido en el laboratorio por un átomo semejante (*d*) por dos razones: el corrimiento hacia el rojo debido a la expansión del universo ha dilatado la longitud de onda media Λ (que pasa del azul al amarillo) y una variación de la constante de estructura fina ha modificado la distancia entre las dos componentes λ_1 y λ_2. Un espectro con este segundo tipo de variación nos haría saber que el valor de la constante de estructura fina en la época en que la luz atravesó la nube es diferente del actual.

atribuirse sentido a una variación de la combinación de las constantes que entran en la expresión de ese radio. La definición del metro se fundamentó después en la longitud de onda de una raya atómica del criptón 86; entonces, no podía medirse ninguna variación de la combinación de constantes que entran en la expresión de esa longitud de onda. Desde el año 1983, el metro se define como la distancia recorrida por la luz en 1/299 792 458 segundos. Eso significa que la velocidad de la luz, *c*, se ha fijado por decreto.

La constante de estructura fina

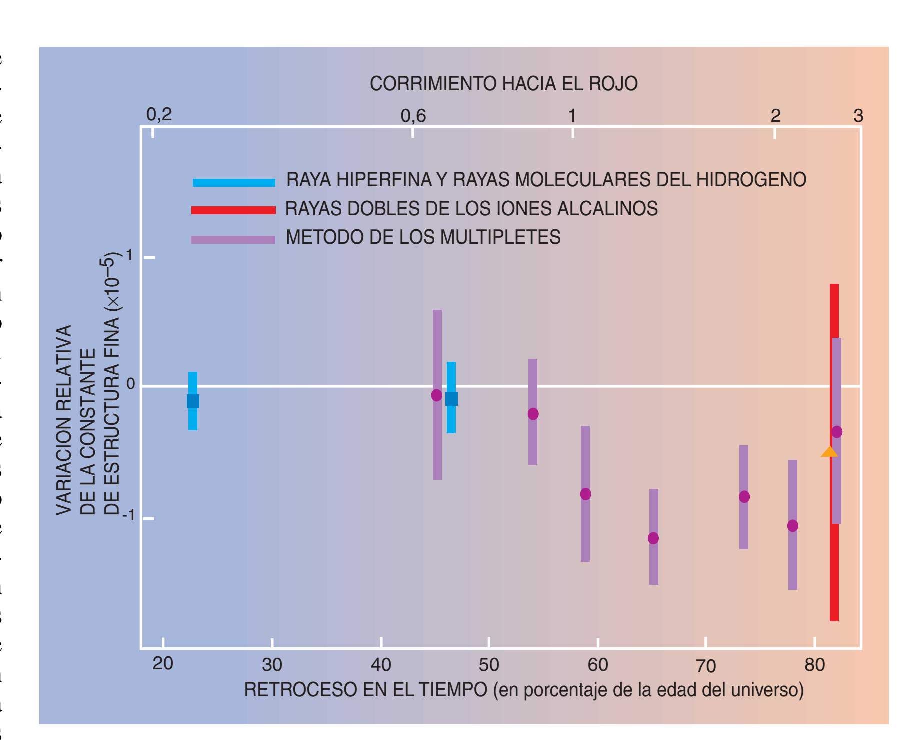
En resumen, si deseamos dotar de sentido a nuestra investigación, deberemos centrarnos en las constantes adimensionales. Si constatamos variaciones en ellas, podremos interpretarlas como una variación de constantes dimensionales, salvo de algunas de éstas que, como la velocidad de la luz, entren en la definición misma de nuestras unidades de medida y deban considerarse fijas. En esta elección arbitraria nos regimos por el mismo principio que aplicamos cuando describimos el movimiento de un objeto material: somos nosotros quienes fijamos el sistema de referencia con respecto al cual definiremos el movimiento.

Entre las constantes adimensionales conocidas por los sucesores de Dirac, la "de estructura fina" recibió mucha atención. Se trata de un número adimensional, la razón entre la carga del electrón y el producto de la constante de Planck por la velocidad de la luz y una constante dimensional, la así llamada permeabilidad del vacío. El valor experimental de la constante de estructura fina, también conocida por constante de acoplamiento electromagnético, es 1/137,0359895; caracteriza la amplitud de los fenómenos electromagnéticos.

Por ello interviene en numerosos fenómenos físicos, como los niveles de energía de los electrones de un átomo. A fin de detectar una eventual variación de la constante de estructura fina, nos es necesario estudiar un sistema físico donde tengan lugar esos fenómenos y que, de un modo u otro, haya guardado, en el curso de su evolución, un registro del valor pasado de dicha constante.

Algunos físicos han estudiado datos geoquímicos. Así, en 1972, el Comisariado de la Energía Atómica descubrió un yacimiento excepcional en la mina de Oklo, en Gabón. Se trata de un reactor nuclear prehistórico que actuó como tal de modo natural durante unos 200.000 años, hace dos mil millones. Hoy, el uranio natural contiene sólo un 0,72 por ciento de uranio 235 (el isótopo más inestable) frente a un 99,29 por ciento de uranio 238. El reactor no podría mantener hoy reacciones en cadena. Pero como la vida media del uranio 235 es menor que la del uranio 238, hace dos mil millones de años el mineral natural contenía un 3,68 por ciento de uranio 235, cifra superior a la fracción crítica del tres por ciento necesaria para el funcionamiento de un reactor. La medida de las concentraciones relativas de los diversos nucleidos producidos cuando el yacimiento de Oklo estaba activo permite reconstruir las condiciones de funcionamiento de este reactor natural. Así, la relación isotópica entre el samario 149 y el samario 147 es 45 veces más débil que en condiciones normales. Esa

anomalía se debe al hecho de que el samario 149 se destruyó al absorber los neutrones lentos a los que estuvo expuesto mientras el reactor funcionó. A partir de la medida de las abundancias de los diversos isótopos del samario, uranio, indio y gadolinio, se estableció el valor de la probabilidad de captura de un neutrón por un núcleo de samario 149. Con ayuda de un modelo del núcleo de samario, puede relacionarse esa probabilidad de captura con el valor de la constante de estructura fina. Establecidos los límites más allá de los cuales no ha podido variar la probabilidad de captura de un neutrón por un núcleo de samario 149, se calculan los límites correspondientes para las posibles variaciones de la constante de estructura fina. La reconstrucción de este complejo rompecabezas ha mostrado que no ha variado en más de un 10^{-5} por ciento durante los últimos dos mil millones de años, o sea, una tasa de variación anual menor que 10^{-14} (suponiendo que la variación sea lineal). Parece, por consiguiente, que la constante de estructura fina no ha evolucionado. Sin embargo, esos resultados dependen de nuestro conocimiento de los mecanismos que actúan en los núcleos atómicos.



4. LAS EVALUACIONES RECIENTES de la constante de estructura fina se fundan en tres métodos diferentes. Su valor se deduce, en el primero, de la comparación de la raya de 21 centímetros, correspondiente a la transición entre dos niveles de energía hiperfinos del átomo de hidrógeno, con las rayas correspondientes a los diferentes estados de la molécula de dihidrógeno (*azul*). En el segundo se la mide con ayuda de las rayas dobles de los iones alcalinos (*rojo*). En el tercer método se comparan dos a dos los espectros de diferentes iones cuyos niveles finos e hiperfinos se correrían en sentidos contrarios a causa de una misma variación de la constante de estructura fina (*malva*). Según estas mediciones, en el curso de la primera mitad de la historia cósmica el valor de la constante era menor que hoy.

El espectro de los átomos

Se evita esa dificultad estudiando el espectro de los átomos; sus características dependen sobre todo de las bien conocidas leyes del electromagnetismo. Cuando se aplican las correcciones impuestas por la relatividad restringida al comportamiento de los electrones en torno al núcleo, se tienen en cuenta efectos electromagnéticos que modifican muy levemente los valores de los niveles de energía. Primero, existe un acoplo entre el espín y el momento orbital del electrón. En física clásica, ese acoplo se describiría así: en el sistema de referencia del electrón, que gira en torno al núcleo, el protón en movimiento engendra un campo magnético. Ahora bien, el electrón, partícula cargada que rota sobre sí misma, vendría a ser una pequeña aguja imanada que interactúa con ese campo magnético ambiente. Según su orientación, la energía del electrón aumenta o disminuye en esa energía de interacción. Además, existe un acoplo entre el espín del núcleo y el del electrón. Estas pequeñas correcciones relativistas se manifiestan en el desdoblamiento de las rayas del espectro del átomo, es decir, en su "estructura fina e hiperfina". Tal como su nombre indica, la amplitud de esas correcciones relativistas depende de la constante que nos interesa.

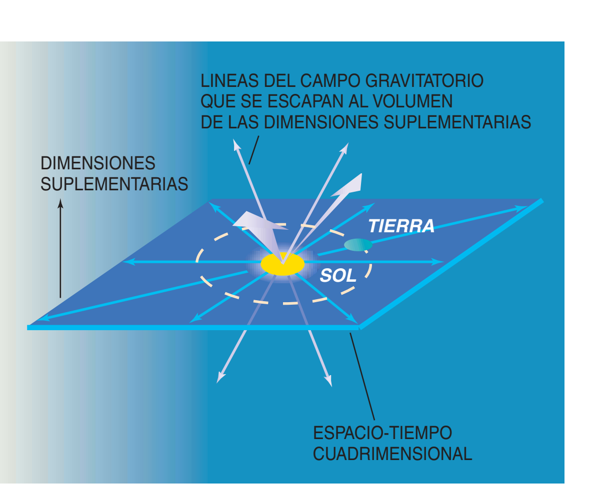
Relojes atómicos y cuásares

En principio, podrían descubrirse las variaciones de la constante de estructura fina estudiando el espectro de ciertos átomos. Las mediciones más precisas se basan en el empleo de relojes atómicos. Para construir uno, se elige un elemento químico, por ejemplo el cesio, y se estudia la onda electromagnética producida por una raya fina o hiperfina de su espectro. La frecuencia de esa onda da la frecuencia del reloj. Ahora bien, una variación de la constante de estructura fina provocaría una alteración de esa frecuencia. Desde luego, para medir esa alteración hay que disponer de otro reloj. Cabe emplear un reloj atómico construido a partir de un átomo diferente; su frecuencia también cambiará, claro está, con la evolución de la constante de estructura fina, pero de forma distinta. La variación de la constante de estructura fina se manifestará en una progresiva pérdida de la sincronía entre los dos relojes atómicos.

Este método de laboratorio puede reproducirse y permite un buen control de los errores posibles. No hace mucho, Christophe Salomon y sus compañeros del Laboratorio Kastler-Brossel, de la francesa Escuela Normal Superior, compararon durante dos años las frecuencias de los

relojes atómicos de cesio y rubidio. Dedujeron así que el valor de la constante de estructura fina no varió en más de 10^{-13} por ciento a lo largo de ese período.

Sin embargo, esas medidas, al igual que los estudios del reactor natural de Oklo, no informan acerca de las variaciones de la constante de estructura fina de hace diez mil millones de años. Es posible que variara en un pasado muy lejano antes de estabilizarse en su valor actual. Para saberlo, hay que recurrir a mediciones astrofísicas. Existen métodos basados en la observación del difuso fondo cósmico y en la abundancia de los elementos ligeros, sintetizados en el curso de los tres primeros minutos del universo, que permiten establecer el valor de la constante de estructura fina en el mismo comienzo de la historia cósmica. Sin embargo, los resultados son aún bastante imprecisos: el valor de la constante entre el primer segundo y los 300.000 primeros años no diferiría del actual en más de uno por ciento.



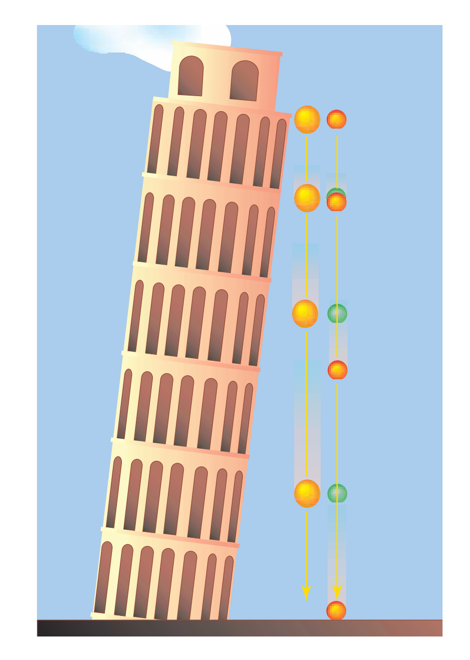
5. LA INTENSIDAD DE LA FUERZA que se ejerce entre el Sol y la Tierra corresponde al número de líneas del campo gravitatorio emanadas del Sol e interceptadas por la órbita de la Tierra. Si el espacio-tiempo estuviera dotado de más de cuatro dimensiones, una parte de esas líneas de campo podría escapar de nuestro universo ordinario. La evolución del volumen de las dimensiones suplementarias se traduciría entonces en una variación de las líneas de campo disponibles en el espacio-tiempo cuadridimensional en que se mueven la Tierra y el Sol; se modificaría así la fuerza que se ejerce entre ellos. Ese fenómeno se nos manifestaría como una variación de la constante gravitatoria.

En 1956, el astrofísico Malcolm Savedoff propuso otro procedimiento para estudiar la constante de estructura fina, basado en el análisis espectral. Durante los primeros mil millones de años de su existencia, el universo se pobló de núcleos de galaxia activos extremadamente energéticos: los cuásares. Son fuentes muy intensas, más o menos repartidas en torno nuestro sobre una esfera de unos 14.000 millones de años luz de radio. Las nubes de gas intergaláctico que existían en épocas ulteriores se nos presentan en un primer plano, por delante de los cuásares; absorbieron parcialmente la luz de éstos. Por esa razón, en los espectros de los cuásares observamos rayas oscuras que nos informan de las propiedades de los átomos de esas nubes del pasado. Resulta posible comparar el espectro, aquí y ahora, de un átomo con el de uno de sus homólogos de otro lugar y otro tiempo. Se comprobará de esa manera si la constante de estructura fina ha variado con el tiempo. Cuanto más lejana la nube, más remota será la época a la que corresponda el espectro estudiado. Es posible, en teoría, estudiar la evolución de la constante de estructura fina a lo largo de un intervalo del orden del 80 por ciento de la edad del universo.

En 2001, John Webb, de la Universidad de Nueva Gales del Sur, y sus colaboradores mejoraron los fundamentos de ese método. Recopilaron 28 espectros de absorción de 13 cuásares diferentes; compararon los desplazamientos de rayas correspondientes a los iones magnesio I y II, aluminio II y III, silicio II, cromo II, hierro II, níquel II y zinc II. Igualmente estudiaron otros 21 espectros de absorción del silicio IV, procedentes de 13 cuásares. El conjunto de esos datos les permitió afirmar que la constante de estructura fina ha disminuido de un 5 a un 10×10^{-3} por ciento entre hace 6000 y hace 11.000 millones de años. ¿Realmente se ha detectado una variación de la constante? La respuesta exige un estudio detallado de todos los fenómenos que pudieran ser causa de errores sistemáticos. Esa lista es larga. Así, al comparar los espectros de diferentes átomos, hay que tener en cuenta que éstos acaso se hallaron en regiones distintas de la nube de gas; por tanto, sus espectros sufrirán quizá corrimientos diversos por efecto Doppler. Además, dos isótopos de un mismo elemento pueden tener espectros apenas distintos, por lo que hay que controlar la composición isotópica de las nubes a fin de asegurarse de que no sea la presencia de un isótopo la causa del desplazamiento de las rayas observadas (estudiando, por ejemplo, otras porciones del espectro). También la existencia de un campo magnético puede correr los niveles de energía. Los procedimientos que siguen los astrónomos generan igualmente riesgo de errores. Así, durante el tiempo de adquisición de los datos, varía la velocidad de la Tierra en su órbita y comunica con ello diferentes efectos Doppler a los espectros registrados en instantes diferentes. También la dispersión de la luz en la atmósfera puede distorsionar el espectro, lo mismo que una variación de temperatura, que hará que cambie el índice de refracción del aire del interior del espectrógrafo.

Los resultados anunciados, pues, deben aún cribarse mediante una larga crítica y someterse a verificación experimental por un equipo independiente y, de ser posible, con sistemas de absorción diferentes. Esos trabajos ya están en curso, especialmente en el VLT, el gran telescopio europeo instalado en Chile. Si el anuncio de Webb se ha tomado más en serio que otros trabajos similares publicados anteriormente, se debe a la originalidad de su método, que compara diferentes espectros en los que una misma variación de la constante de estructura fina rebaja ciertos niveles energéticos y eleva otros. Parecería poco probable que la constatación de la existencia de una serie de corrimientos en sentidos opuestos, pero que se explican mediante una misma variación de la constante de estructura fina, fuese producto de una coalición maquiavélica del conjunto de errores sistemáticos posibles. Sin embargo, la prudencia aún no sobra y el mérito principal de ese trabajo es que in-

6. SEGUN EL PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA, la inercia de un cuerpo, o masa inercial, es igual a su sensibilidad a la gravedad, su masa gravitatoria. Por ello se habla simplemente de la masa de un cuerpo para designar ambas propiedades. Una de las consecuencias de este principio es la universalidad de la caída libre: todos los cuerpos caen en el vacío de la misma manera (*verde*). Si la constante de estructura fina variase con el tiempo y con el espacio, la energía electromagnética contenida en un objeto variaría de un punto a otro de la trayectoria y, en virtud de la ecuación $E = mc^2$, su masa variaría igualmente. En consecuencia, fallaría la universalidad de la caída libre.



augura un método de medida nuevo y parece que prometedor.

Teorías con constantes blandas

Muy recientemente, Aleksandr Ivanchik y Dmitri Varshalovich, del Instituto Ioffe, en San Petersburgo, así como Esther Rodríguez y Patrick Petitjean, del Instituto de Astrofísica de París, han sugerido que ciertos espectros de absorción indican una variación de la relación entre las masas del protón y el electrón. Sus datos se fundan en los corrimientos espectrales de rayas correspondientes a diferentes estados de vibración y de rotación de la molécula de hidrógeno en nubes moleculares lejanas. Según ese estudio, la relación entre las masas del protón y el electrón habría aumentado entre un 0,019 y un 0,095 por mil a lo largo de diez mil millones de años. Al igual que con las medidas de la constante de estructura fina, aún estamos lejos de haber establecido la validez de ese resultado. Sin embargo, de confirmarse, sería un filón para los teóricos. La razón entre las masas del protón y el electrón depende de unas constantes fundamentales distintas de la constante de estructura fina. Ahora bien, precisamente las teorías que admiten una variación de la constante de estructura fina predicen que las constantes de acoplo de las demás interacciones variarían correlativamente. Por tanto, podemos esperar que esas teorías puedan comprobarse con ayuda de mediciones de ese tipo.

Hoy, como en la época de Dirac, las preguntas de los físicos acerca de la estabilidad de las constantes pretenden sacar a la luz la existencia de una física diferente, más allá de nuestras teorías. El escollo para la unificación de las leyes de la física es la teoría de la gravitación, una interacción que no sabemos cómo unificar con las otras tres fuerzas de la naturaleza. Ahora bien, una variación de las constantes fundamentales tendría unas consecuencias directas en nuestra concepción de la gravitación.

Si la gravitación quedase descrita por la teoría de la relatividad generalizada (como ocurriría también aunque se rigiese por la teoría de Newton), las constantes deberían ser perfectamente fijas. He aquí por qué: si, por ejemplo, la constante de estructura fina evolucionase en el tiempo y en el espacio, la energía de enlace electromagnético responsable de la cohesión de un cuerpo variaría. Según la ecuación $E = mc^2$, la masa de un cuerpo cambiaría con su posición. En virtud del principio de conservación de la energía, un cuerpo cuya masa variase de un punto a otro de su trayectoria se aceleraría cuando se desplazase hacia una zona donde su masa disminuyera (y se desaceleraría en el caso contrario). Más aún, como la energía electromagnética del protón difiere de la del neutrón, esa variación de masa dependería de la proporción de protones y neutrones contenidos en un objeto y, por consiguiente, sería distinta para cuerpos de composiciones químicas diversas. En otras palabras, los cuerpos en caída libre en el espacio sufrirían una nueva fuerza dependiente de su composición, resultado que contradiría la universalidad de la caída libre (el hecho de que, en el vacío, todos los cuerpos caen con la misma aceleración). Ahora bien, el principio de la universalidad de la caída libre, a veces llamado principio de equivalencia, es uno de los fundamentos de la relatividad general.

En consecuencia, cuando se efectúan experiencias sobre la estabilidad de las constantes, se comprueba la validez del principio de equivalencia y, por ende, de nuestras teorías de la gravitación. Si las variaciones anunciadas se probaran, significaría que la relatividad general y el principio de equivalencia no son sino marcos teóricos provisionales, que habría que ampliar. Por ello, de esas medidas no podemos deducir directamente unas leyes de la gravitación "mejores", pero sí empezar a poner a prueba las distintas teorías que permiten, ya ahora, tomar en cuenta tales variaciones, especialmente las teorías de cuerdas.

Las teorías de cuerdas, cuyo fin es unificar las cuatro interacciones fundamentales —y dar una descripción de la gravedad a muy altas energías—, están definidas en espacio-tiempos de 10 u 11 dimensiones. Para los teóricos, nuestro mundo presenta sólo cuatro dimensiones porque las otras están enrolladas sobre longitudes muy cortas, que la resolución de nuestros experimentos aún no puede revelar. Ahora bien, el volumen de esas dimensiones suplementarias debería influir en el valor observado de las constantes de acoplo de las interacciones fundamentales.

El número de las líneas de fuerzas procedentes de la fuente de un campo e interceptadas por una partícula determina la intensidad de la fuerza transmitida por ese campo (*véase la figura 5*). Ahora bien, algunas de esas líneas podrían escapar hacia el volumen de las dimensiones

suplementarias. Por consiguiente, la intensidad de una interacción fundamental depende del volumen de las dimensiones suplementarias y evolucionaría si ese volumen variase.

Por otro lado, además de las cuatro interacciones fundamentales, las teorías de cuerdas predicen la existencia de una quinta interacción, transmitida por una partícula llamada dilatón. El dilatón interacciona de diversas formas con las partículas materiales y causa igualmente una variación de las constantes de acoplo de las demás interacciones.

El volumen de las dimensiones suplementarias y el dilatón son magnitudes dinámicas que pueden variar en el tiempo y en el espacio; por consiguiente, las teorías de cuerdas predicen una variación de las constantes de acoplo de las interacciones fundamentales, entre ellas la constante de estructura fina. Recalquemos que si ese mecanismo interviene en los fenómenos que Webb y sus compañeros creen haber observado, no es previsible que sólo varíe la constante de estructura fina y las otras permanezcan fijas.

Si el estudio de la inmutabilidad de las constantes constituye una puesta a prueba del principio de equivalencia, las mediciones directas de la universalidad de la caída libre nos informan, a la inversa, de la eventual variación de dichas constantes. Hoy, el principio de equivalencia se comprueba con gran precisión en el laboratorio y en el espacio. Un experimento de telemetría láser, el *Lunar Laser Ranging*, que observa la trayectoria de la Luna desde hace 30 años con una precisión de un centímetro, ha permitido concluir que la Tierra y la Luna caen en el campo gravitatorio del Sol con la misma aceleración (casi 10^{-14} centímetros por segundo al cuadrado). De este límite de la violación del principio de equivalencia se deduce una cota para la variación espacial de la constante de estructura fina: sobre una distancia del orden de la órbita terrestre, la constante no puede variar más que una parte en 10^{32} por centímetro. Si se extrapola groseramente esa variación a las dimensiones del universo observable (unos 15.000 millones de años luz), la variación de la constante de estructura fina a esa escala no podría rebasar una parte en 10^4, un orden de magnitud por encima de las medidas del equipo de Webb. Significa que son compatibles con las comprobaciones del principio de equivalencia hasta ahora realizadas en el sistema solar.

Nuevas experiencias

En un futuro próximo, dos laboratorios espaciales, *Microscope* y STEP, que serán lanzados, respectivamente, por la Agencia Espacial Europea y la NASA, someterán a prueba el principio de equivalencia con una precisión de 100 a 100.000 veces mayor que en experimentos anteriores. Es muy probable que, si la variación de la constante de estructura fina es real, estos laboratorios detecten una violación del principio de equivalencia.

Desde un punto de vista teórico, la detección de tal variación sería una prueba indiscutible de la existencia de una física nueva. Así como la teoría de la relatividad generalizada despojó al espacio-tiempo de su estructura rígida e inalterable, las nuevas teorías de las altas energías retiran la inmutabilidad a las constantes. Desgraciadamente, las teorías de cuerdas no nos proporcionan por ahora ningún mecanismo de estabilización de las dimensiones suplementarias y del dilatón que explique la casi inmutabilidad actual de las constantes. Además, si se confirma alguna medición que arroje que la constante de estructura fina varía, habrá que explicar por qué la estabilización de esas cantidades fue a la vez tan eficaz y tan tardía —si es que a los dos mil millones de años de la gran explosión no se hubiese producido todavía— en la historia del universo.

Bibliografía complementaria

LES CONSTANTES UNIVERSELLES. G. Cohen-Tanoudji. Hachete, París, 1995.

NUEVAS DIMENSIONES PARA OTROS UNIVERSOS. N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos y G. Dvali, en *Investigación y Ciencia*, octubre de 2000.

Jean Michel Courty y Édouard Kierlik

El aceite de Flandes

Aunque chinche, que al óleo pinte,
porque no quiero una acuarela, ni lela.

El dicho de la cantinela falsea las cosas, pues la acuarela también es difícil. La pintura al agua tiene, mucho más que la pintura al óleo, el inconveniente de que fluye. Lo ideal es que una buena pintura se extienda con facilidad, pero no debe fluir, características al parecer incompatibles que las pinturas de calidad, sin embargo, poseen a la vez. A los pigmentos los pintores les exigen otras cualidades. A veces desearán superponer las capas sin que se mezclen; otras veces, por el contrario, querrán modificar un color con otro a fin de conseguir un tono preciso. Para ello han creado sustancias que pueden trabajarse de nuevo a discreción. Analicemos sus propiedades físicas para entender cómo las obtuvieron los pintores.

La viscosidad de un fluido mide su resistencia a deformarse o a fluir. El agua y los alcoholes fluyen y se extienden fácilmente; son líquidos poco viscosos. La miel líquida es de gran viscosidad; es difícil de extender y fluye lentamente. Para graduar la consistencia de las pinturas, los pintores de brocha gorda se valen de una "copa Ford", una copela de forma y cabida fijas, con la base perforada. La viscosidad se estima por el tiempo que tarda la copa en vaciarse. Esa técnica se usa para comparar la viscosidad de una mezcla con la de una pintura patrón.



BRUNO VACARO

1. El pincel imprime a la pintura una deformación de cizalla: la extiende como un mazo de cartas bajo la mano del jugador

Sin embargo, esta medición constituye un mal ensayo de la extensibilidad de una pintura. Para apreciar esta cualidad, hay que crear una situación similar a dar una pincelada. También los físicos introducen una cierta cantidad de fluido entre dos placas para medir la viscosidad; luego desplazan la placa superior, pero manteniendo constante el espesor de la lámina de fluido. La deformación que sufre el fluido en tal situación se llama cizalla. Es semejante a la de un mazo de cartas que se extienda sobre una mesa: mientras una mano desplaza a un lado las cartas de arriba, la última queda quieta. Las cartas intermedias se mueven todas, cada una arrastrada por la carta de arriba y retenida por la de abajo. Lo mismo pasa en un fluido sometido a cizalla: la capa de fluido en contacto con la placa móvil es arrastrada, la que está en contacto con el fondo no se mueve. La velocidad de las capas intermedias es proporcional a su altura en el fluido. Midiendo la fuerza necesaria para mover la placa superior, los físicos deducen el valor de la viscosidad.

Para ciertos fluidos, como el agua, el aceite e incluso los almíbares y la miel, esa fuerza es proporcional a la velocidad de la placa. De ellos se dice que son newtonianos. (Newton estudió su comportamiento.) Las pinturas newtonianas son de empleo difícil por su tendencia a fluir. Los colores de acuarela, por ejemplo, constituidos por una pequeña cantidad de pigmentos suspendidos en agua, fluyen casi como ésta. Ahora bien, la más mínima gota arruina un dibujo. Para evitar que chorree, de nada sirve aumentar la viscosidad. Cuesta extender la miel, otro fluido newtoniano, pero seguro que fluirá despacio después de que la hayamos untado en la rebanada de pan.



La Kermesse de Rubens, MUSEO DEL LOUVRE

Los fluidos de Bingham

En 1920, el americano Eugene Bingham, asombrado de que ciertas pinturas no fluyesen como la miel, estudió su comportamiento y describió un extraño fenómeno. Con él se topan quienes emplean la copa Ford para probar pinturas grasas y pigmentadas. Observarán que la mezcla deja de fluir antes de que el recipiente se vacíe. El fluido que se halla a la altura del orificio soporta el peso de toda la columna de pintura que tiene encima. ¿Qué ocurre al llenar otra vez la copa? La pintura vuelve a fluir hasta que vuelve al nivel precedente. Se llama fluidos de Bingham a los que dejan de fluir espontáneamente. Las fuerzas que crean el movimiento deben primero llegar en su seno a un umbral antes de que el fluido "arranque". Mientras no se llegue a ese umbral, el fluido se deformará sin moverse, igual que un sólido. Tales fluidos son más corrientes de lo que parece; ahí están el dentífrico y la mantequilla.

¿Cómo se explica ese umbral de fuerza? En su mayoría, tales fluidos son suspensiones de partículas

casi esféricas en un solvente. Los tamaños de las partículas varían entre algunos nanómetros y algunas décimas de micra. Cuando la concentración de partículas es baja, como en los colores de acuarela o en el gouache diluido, el único efecto de su presencia es aumentar la viscosidad, proporcional a la concentración de partículas. Si la concentración aumenta más y más, las partículas acabarán tocándose y el solvente ocupará sólo los intersticios. El líquido se volverá entonces pastoso a causa de las fuerzas que se ejercerán entre las partículas; para lograr que fluya hay que vencerlas. Si no hubiera pinturas que fuesen fluidos de Bingham, los pintores de paredes no podrían trabajar eficazmente. Cuando ejercen una fuerza tirando del pincel, la pintura se extiende; en cambio, se fija en cuanto se la abandona a sí misma, pues su propio peso no basta para hacerla chorrear.

Los arrepentimientos

Preciosa para los pintores de brocha gorda, esa cualidad es aún insuficiente para los artistas. A menudo un pintor deseará rehacer una porción de un cuadro ya pintado. Reelaborará la capa ya existente, o la cubrirá con nuevos colores. Las acuarelas se recubren fácilmente, con tal de esperar los pocos minutos necesarios para que se seque la primera capa. En cambio, con ellas es imposible toda modificación posterior. Los retoques, en cambio, son posibles con las pinturas al óleo, cuyo tiempo de secado es mucho mayor. Así, el pintor dispone de todo el tiempo que quiera para añadir y combinar colores, lo cual facilita los incomparables matices de la pintura al óleo. Sin embargo, cuando el artista quiere cambiar de color, debe cubrir la primera capa con una nueva. Entonces, ¿cómo evitar que se mezclen? El problema ha preocupado mucho a los pintores. Para resolverlo, inventaron en el siglo XVII un aditivo: el “aceite de Flandes”. Las pinturas al aceite de Flandes evolucionan de una manera que conjuga las ventajas de la pintura al óleo con las de la pintura al agua.



3. Los fluidos newtonianos, tales como el agua o la miel, acaban siempre fluyendo. La pintura al óleo al no ser newtoniana, tampoco fluye

A esas mezclas los físicos las califican de tixótropas. Cuando se las agita se fluidifican, pero recuperan poco a poco su estado inicial si se las deja reposar. ¿Cuáles son las propiedades de una pintura al aceite de Flandes? Primero se comporta como un fluido de Bingham: basta una pequeña fuerza con el pincel para extenderla. Luego, dejada a sí misma, se fija en pocos minutos como la gelatina, pero sin secarse. Siempre es posible extenderla, pero la fuerza necesaria aumenta con el tiempo. Para recubrirla, el pintor da unas pinceladas muy leves, para no superar el umbral de fluidez de la primera capa, pero lo bastante fuertes para superar el de la pintura fresca que está aplicando. Si, por contra, quiere fundir los colores de las dos capas, sólo tendrá que apoyar el pincel con fuerza suficiente para vencer el umbral de fluidez de la de abajo. Al recobrar su fluidez, ésta se mezcla con la nueva. Así, los pintores del siglo XVII consiguieron la cuadratura del círculo; inventaron un compuesto que cumple todas las características deseables en una pintura de artista: extenderse con facilidad, fijarse, dejarse recubrir con facilidad y secarse lentamente.

Pinturas tixótropas

El estudio de un modelo de arcilla aclara el comportamiento de los fluidos tixótropos. La laponita es una arcilla sintética cuyas partículas miden del orden de decenas de nanómetros. Una suspensión poco concentrada de laponita constituye un fluido tixótropo. Las partículas de laponita se agrupan primero en agregados densos, cuyo tamaño llega a la micra. Después, esos agregados forman conjuntos poco consistentes, una especie de cadenas de perlas que, en algunos lugares, van soldadas. Todos esos enlaces aumentan la viscosidad de las suspensiones de laponita; esto las fija. La situación cambia al agitar la arcilla: ceden primero los enlaces entre las cadenas; si luego se agita más fuerte, las cadenas se rompen y se produce una suspensión de micropartículas; finalmente, al agitar aún más fuerte, se fragmentan también los agregados en trozos más pequeños. Vemos que la mayoría de los enlaces entre partículas desaparecen mientras se agita; en consecuencia, se fluidifica la suspensión. La fluidez, sin embargo, disminuye poco a poco en cuanto se deja reposar la arcilla, ya que las partículas en suspensión vuelven a formar agregados, que vuelven a formar cadenas, que vuelven a soldarse...



2. El aceite de Flandes, inventado en el siglo XVII, produce la pintura al óleo tixótropa, que, aunque se fluidifica bajo la presión del pincel, se fija en cuanto se la deja reposar. Gracias a ella Rubens habría pintado su famoso cuadro La Kermesse *en 24 horas*

La composición exacta del aceite de Flandes sigue siendo hoy desconocida, pero sabemos que contiene aceite de linaza hervido y resina. Esta, disuelta en el aceite, se dispersa en pequeñas esferas. Entre los componentes se van formando enlaces; de ahí que la pintura se fije en pocos minutos. Esa inmovilización no evita que hagan falta días, incluso meses, antes de que una misma pintura se seque del todo. Gracias a ese aceite maravilloso, Rubens habría pintado *La Kermesse* en 24 horas.

BRUNO VACARO

JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M. R. Parrondo

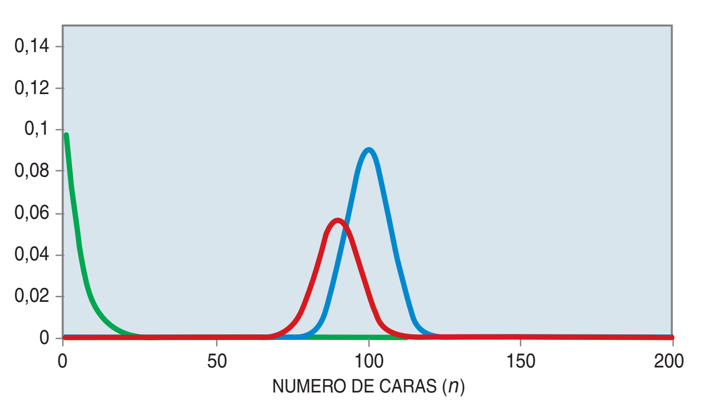
Ruletas, monedas y entropía

Si en la ruleta de un casino ha salido cinco veces seguidas el mismo número, incluso al jugador más racional le temblaría la mano antes de apostar una vez más a dicho número. Sin embargo, basta un momento de reflexión para darse cuenta de que la bola saltarina de la ruleta, si el crupier es honrado, no recuerda en absoluto los números sobre los que se ha posado en las últimas cinco tiradas. Por tanto, todos los números tienen la misma probabilidad de salir en la sexta.

A pesar de ello, es verdad que la repetición del mismo número seis veces seguidas es algo muy improbable. ¿Significa esto que la bola tiene una cierta memoria de lo ocurrido y evita los números que han aparecido con anterioridad? En absoluto. La clave está en que la probabilidad de que salga el 15 seis veces seguidas es exactamente igual a la de que salga cualquier otra secuencia, por ejemplo, la 8, 22, 13, 4, 9, 17. Cuando decimos que la repetición del mismo número seis veces seguidas es muy improbable, lo que en realidad queremos decir es que es mucho menos probable que salga una secuencia de ese tipo que una secuencia en donde todos los números sean distintos. Aunque cada secuencia tiene la misma probabilidad, hay muchas más secuencias con todos los números distintos que con todos los números iguales. En concreto, hay sólo 37 secuencias con los seis números iguales (recordemos que la ruleta tiene 37 números), mientras que hay $37 \times 36 \times 35 \times 34 \times 33 \times$ $\times\ 32 = 1.673.844.480$ secuencias con los números distintos. Por ello, la probabilidad de que salgan seis números iguales es, aproximadamente, de una entre 100 millones, mientras que la probabilidad de que salga una secuencia con todos los números diferentes es del 65 %.

En este ejemplo se muestra claramente la diferencia entre las probabilidades de secuencias concretas y las de *tipos* de secuencias. La probabilidad de cada secuencia concreta es siempre la misma, mientras que las probabilidades de tipos de secuencias pueden ser muy diferentes. En nuestro ejemplo, el tipo de secuencia salir-seis-veces-el-mismo-número es 45 millones de veces más improbable que el tipo de secuencia salir-seis-números-distintos. La probabilidad de un tipo de secuencia se calcula de forma muy sencilla. Basta multiplicar la probabilidad de una secuencia concreta por el número de secuencias de dicho tipo.

Esta distinción entre secuencias concretas y tipos de secuencia, y el modo como se calculan las probabilidades de cada tipo, es la base de uno de los conceptos más profundos y relevantes de la física moderna: la entropía.



1. La curva verde representa la probabilidad de una secuencia concreta con n *caras; la azul, el número de secuencias con* n *caras; la roja, la probabilidad de que salga una secuencia cualquiera con* n *caras. La escala vertical corresponde sólo a la curva roja*

Veamos este cálculo para un caso más sencillo. Supongamos que lanzamos una moneda 200 veces. La moneda está trucada, de modo que la probabilidad de que salga cara es 0,45 y de que salga cruz es 0,55. ¿Cuál es la probabilidad de obtener n caras y 200-n cruces? En este caso, las secuencias concretas no son igualmente probables, puesto que es más probable la cruz que la cara. La probabilidad de sacar, por ejemplo, dos caras en dos tiradas, es $0{,}45 \times 0{,}45$. Como las probabilidades se multiplican, la probabilidad de una secuencia concreta que contenga n caras y 200-n cruces será: $0{,}45^n \times \times\ 0{,}55^{200-n}$. El resultado de esta fórmula es la curva verde de la figura 1 (dibujada con un cambio de escala por conveniencia). Como vemos en la figura, la secuencia concreta más probable es la de cero caras y 200 cruces. Aunque parezca increíble, si tuviéramos que apostar por una secuencia concreta entre las $2^{200} = 1{,}6 \times 10^{60}$ posibles secuencias, lo más inteligente sería apostar a la de 200 cruces seguidas.

Sin embargo, todo cambia si consideramos tipos de secuencias. Secuencias con 200 cruces sólo hay una. Tenemos, sin embargo, 200 secuencias con 1 cara y 199 cruces. Con dos caras y 198 cruces, hay ya 19900 posibilidades y con 100 caras y 100 cruces hay casi 10^{59} posibilidades, un número extraordinariamente grande. En la figura 1, también con una escala adecuada para que pueda verse con claridad, he dibujado en azul el número de posibilidades para cada tipo de secuencia.

Finalmente, la probabilidad de cada tipo es el producto de la proba-

bilidad de la secuencia y del número de posibilidades, y el resultado lo he dibujado en rojo en la misma figura. La curva roja tiene su máximo en $n = 90$. Este resultado era esperable: puesto que la probabilidad de que salga cara es 0,45, en un número grande de tiradas deberán salir un 45 % de caras y un 55 % de cruces, y el 45 % de 200 es 90.

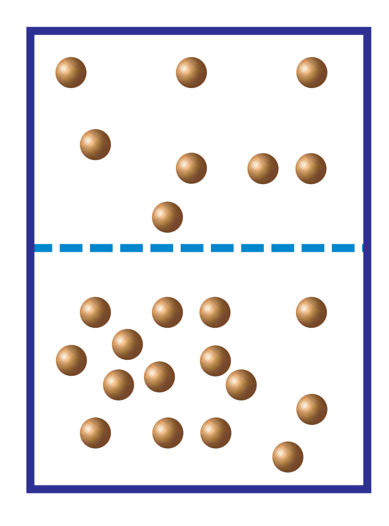
Lo interesante es que las secuencias concretas que constan de 90 caras y 110 cruces son mucho menos probables que la secuencia con 200 cruces, como se ve en la curva verde. La probabilidad de cada tipo, es decir, la curva roja, es el resultado de la combinación de las otras dos curvas. A finales del siglo XIX, el físico austríaco Ludwig Boltzmann utilizó esta combinación para resolver uno de los enigmas más profundos de la física: conciliar el comportamiento del mundo macroscópico con las leyes que rigen el mundo microscópico de los átomos y las moléculas. Cada uno de estos mundos se comporta de manera diferente: en el microscópico el movimiento no cesa, no hay fricción, la energía no se pierde, no hay una flecha del tiempo que distinga el pasado del futuro; en el macroscópico, los cuerpos sufren fuerzas de fricción y tienden a pararse, la energía se disipa en forma de calor inutilizable y hay infinidad de procesos irreversibles, como cuando se hace añicos una copa de cristal al caer al suelo.

Boltzmann se dio cuenta de que la diferencia entre el mundo microscópico y el macroscópico era en realidad una diferencia “de mirada”, y que esa diferencia, aun tan simple y sutil, podía explicar los distintos comportamientos de cada uno de los mundos. Cuando miramos el mundo microscópico vemos el movimiento detallado de cada partícula que nos rodea, mientras que cuando miramos el macroscópico sólo vemos los comportamientos colectivos.

Estos dos tipos de “mirada” se dan también en nuestro ejemplo de las secuencias. Un jugador “microscópico” apostará a qué secuencia concreta saldrá en 200 tiradas de una moneda. Por el contrario, uno “macroscópico” será el que apueste al número total de caras de la serie; sólo le interesa el *tipo* de secuencia.

En un sistema físico, llamamos estados microscópicos a las secuencias concretas y estados macroscópicos a los tipos de secuencias. La probabilidad de que se dé un estado microscópico es mayor cuanto menor es su energía. Pero esa probabilidad es la de un estado microscópico concreto, igual que la curva verde de la figura 1 es la probabilidad de una secuencia concreta. Al pasar al mundo macroscópico las cosas cambian radicalmente, igual que en el ejemplo de la moneda las probabilidades de los tipos de secuencia difieren mucho de las probabilidades de las secuencias concretas. Esto es debido a que también un estado macroscópico puede darse en forma de un gran número de estados microscópicos. En un sistema físico, el equivalente a la curva azul de la figura 1 es el número de estados microscópicos compatibles con un estado macroscópico dado. Boltzmann demostró que la entropía, una magnitud que había aparecido al estudiar gases y motores térmicos pero cuya naturaleza era aún misteriosa, estaba relacionada con ese número de estados microscópicos compatibles. En concreto, la entropía es proporcional al logaritmo de dicho número, y la importancia de esta relación matemática es tal que se encuentra grabada sobre la tumba de Boltzmann en el cementerio de Viena.

Pensemos, por ejemplo, en un gas contenido en un recipiente, a su vez dividido en dos por una pared permeable. La energía es menor en el recinto inferior. Por lo tanto, cada molécula “preferirá” estar en ese recinto, igual que con nuestra moneda cada tirada “prefería” ser cruz en lugar de cara. Sin embargo, en una observación macroscópica no nos interesa el comportamiento de cada una de las moléculas sino sólo el comportamiento colectivo, que en este caso podría ser la fracción de moléculas que haya en cada recinto. El problema del gas es entonces idéntico al problema de la moneda, y de la misma manera que lo hicimos con las 200 tiradas, se puede demostrar que en el estado macroscópico más probable habrá una fracción apreciable de moléculas en el recinto superior. El valor concreto de esta fracción es el resultado de la combinación de un factor energético y de un factor entrópico, que son los análogos a las curvas verde y azul, respectivamente, de la figura 1. Los detalles matemáticos, aunque no son muy complicados, van más allá de la intención de este artículo. Pero sí es interesante mencionar que, cuanto menos pesadas son las moléculas y más calientes están, más importante es el factor entrópico y, por tanto, las moléculas tienden a estar repartidas por igual en los dos recintos. Fíjense también que, si no fuera por el factor entrópico, el estado más probable sería aquel en el que todas las moléculas se encontrarían en el recinto inferior, con la mínima energía posible. De hecho, así ocurre cuando la temperatura es de menos 273 grados centígrados. Si no fuera por la entropía, las moléculas que componen el aire que respiramos se precipitarían al suelo. La entropía también explica por qué moléculas muy ligeras, como las de hidrógeno, no pueden ser retenidas por el campo gravitatorio terrestre y no forman parte de la composición del aire.



2. Un gas cuyas moléculas pueden estar en el recinto superior o en el inferior. En el inferior la energía es menor pero, debido al efecto de la entropía, el estado macroscópico más probable es aquel en el que una fracción apreciable de moléculas se encuentran en el recinto superior

parr-km0@zenon.fis.ucm.es

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

Jugar a invertir

Supongamos que usted gestiona un fondo de inversión en empresas de nuevas tecnologías. Ha encontrado usted 11 compañías que ofrecen una probabilidad aceptable de convertirse en minas de oro y proporcionar, cada una, al fondo réditos 10 veces mayores que la inversión que se efectúe en ellas. Los inversionistas del fondo, sin embargo, no desean correr riesgos en su carrera hacia la fortuna. ¿Podrá usted servirse de sus conocimientos matemáticos para aumentar la probabilidad del éxito especulativo?

Veamos un problema preliminar. El fondo dispone de 17 millones de euros para invertir; cada una de las 11 compañías tiene una probabilidad del 40 por ciento de producir rendimientos 10 veces mayores que lo invertido y un 60 por ciento de irse a pique. Sus inversionistas desean una probabilidad del 60 por ciento como mínimo de que el fondo alcance al menos 60 millones. ¿De qué modo debe usted distribuir los 17 millones entre las compañías?

Es evidente que no podrá poner todo el dinero en una sola compañía, pues su probabilidad de éxito es sólo del 40 por ciento. Pero si se invierte en dos, la probabilidad de que al menos una tenga éxito es del 64 por ciento (pues la probabilidad de que ambas fracasen es de $0{,}6 \times 0{,}6 = 0{,}36$). Por consiguiente, si aplica una inversión de 6 millones en cada una de las dos compañías, podrá prometer un rédito de 60 millones, con probabilidad mayor que el 60 por ciento exigido; dispondrá todavía de 5 millones de reserva, por si surgieran mejores oportunidades de inversión. No es buena estrategia dispersar más las apuestas. Si, por ejemplo, se invirtiesen 3 millones en cada una de cuatro compañías, con la esperanza de que dos o más recogieran buenos frutos, la probabilidad de asegurar los 60 millones requeridos es sólo de un poco más del 50 por ciento.

Supongamos ahora que la situación económica mejora sustancialmente, tanto que cada una de las compañías tiene una probabilidad del 95 por ciento de decuplicar la inversión. Pero ahora las exigencias de los inversionistas han crecido parejamente, pues desean que el fondo garantice, al menos, 100 millones con una probabilidad no menor del 95 por ciento. Como antes, no es posible cumplir ambos requisitos dedicando toda la inversión a una sola compañía. Tampoco se logra repartiéndola por igual entre dos compañías: aunque la probabilidad de que al menos una tenga éxito es de 97,75 por ciento, al decuplicar la inversión de 8,5 millones sólo se obtienen 85. ¿Podrá usted descubrir la forma de atender los objetivos de los inversionistas, manteniendo en reserva tanto dinero como sea posible?

Solución del problema del mes pasado:

El perímetro mínimo del cilindro repeluciclo es 14. La composición de los anillos apilados es: esmeralda (8), carmesí (6); aguamarina (4), blao (5), blao (5); dorado (7), dorado (7); y carmesí (6), aguamarina (4), aguamarina (4). En el caso de los minirrepeluciclos, sean las longitudes de los filamentos A = 2, B = 3, C = 4, D = 5 y E = 7. Esta será la composición de los anillos: E, DA, AAB y BC.

Solución en la Red

Se puede ver la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.



SARA CHEN

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



CONTROL CEREBRAL DE ROBOTS, por Miguel A. L. Nicolelis y John K. Chapin

Algún día, quienes sufren lesiones nerviosas o parálisis podrán gobernar los movimientos de sillas de ruedas, prótesis e incluso extremidades paralizadas "pensando en ellas".

VACIOS ESPACIALES, por Evan Scannapieco, Patrick Petitjean y Tom Broudhurts

El espacio posee distintos grados de desolación. Sin embargo, ni siquiera en la vasta inmensidad entre galaxias puede hablarse de vacíos absolutos.

EL VEHICULO DEL CAMBIO, por Lawrence D. Burns, J. Byron McCormick y Christopher E. Borroni-Bird

Los coches de pilas de combustible podrían ser catalizadores de un futuro más limpio.

MUTACION Y RESISTENCIA A LOS ANTIBIOTICOS, por Fernando Baquero, Jesús Blázquez y José Luis Martínez

Los antibióticos no se limitan a seleccionar cepas resistentes. Incrementan también la tasa de mutación de las bacterias, acelerando la variabilidad genética y aumentando, por tanto, las posibilidades de adquisición de resistencia.

TECNICA CONTRA TERROR, por Rocco Casagrande

Biólogos e ingenieros están ideando sistemas de alerta precoz, aptos para detectar un ataque bioterrorista a tiempo.

EVOLUCION DEL COLOR DE LA PIEL HUMANA, por Nina G. Jablonski y George Chaplin

El color de nuestra piel ha evolucionado en una suerte de fino compromiso entre la tendencia hacia la tonalidad obscura para evitar que la radiación solar destruya sus nutrientes y la tendencia hacia la tonalidad clara para promover la producción de vitamina D.

TIBURONES DE AGUA DULCE, ACTUALES Y FOSILES, por Gilles Cuny

Los antepasados de los tiburones colonizaron las marismas y los ríos hace más de 350 millones de años. Ya estén adaptados al agua de mar o a las aguas dulces, según las limitaciones ambientales, representan un éxito evolutivo sin parangón.

PARARRAYOS EN NANOELECTRONICA, por Steven H. Voldman

Las descargas electrostáticas constituyen una amenaza que impide aumentar la velocidad y la miniaturización de los dispositivos electrónicos.

